

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО ”
Факультет електроніки
Кафедра електронної інженерії

"На правах рукопису"

УДК УДК 621.3.082

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.І. Тимофєєв

“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 153 мікро– та наносистемна техніка

на тему: «Дослідження кінетичних властивостей електронів в твердих розчинах
InGaN і InAlN»

Виконав: студент 2 курсу, групи ДМ–91мп

Борс Вікторія Олексіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник доц. каф. ЕІ, к.т.н., Саурова Т. А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

_____ (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки
Кафедра електронної інженерії
Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
програмою
Спеціальність 153 мікро– та наносистемна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Володимир ТИМОФЄЄВ

“ ____ ” _____ 20__ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження кінетичних властивостей електронів в твердих розчинах InGaN і InAlN»

Науковий керівник доц. каф. ЕІ, к.т.н., Тетяна САУРОВА,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “5” листопада 2020 року №3241–с

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження напівпровідникові матеріали InGaN та InAlN.

4. Вихідні параметри _____

5. Перелік питань, які потрібно розробити: розглянути попередні дослідження обраних матеріалів; провести чисельні розрахунки рухливості; провести дослідження і моделювання поле-швидкісної характеристики.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: графіки залежності параметрів від вмісту індію, графіки залежностей рухливості від температури, графіки залежностей дрейфової швидкості від напруженості електричного поля, графіки залежностей дрейфової швидкості від часу в імпульсному режимі електричного поля.

7. Орієнтовний перелік публікацій: _____

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

8. Дата видачі завдання 18.09.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний огляд матеріалів за темою магістерської дисертації.	01.12.2019– 01.09.2020	
2	Визначення вихідних параметрів бінарних напівпровідників що визначають параметри InGaN та InAlN.	01.09.2020 – 15.01.2020	
3	Моделювання поведінки носіїв заряду в слабких електричних полях: частоти зіткнень електронів, часів релаксації імпульсу та енергії.	15.01.2020– 15.03.2020	
4	Розрахунок температурної залежності рухливості електронів в режимі слабого електричного поля, співставлення з експериментальними результатами	15.03.2020 – 25.04.2020	
5	Моделювання поведінки носіїв заряду в сильних електричних полях. Розрахунок дрейфової швидкості .	25.04.2020– 10.06.2020	
6	Дослідження дрейфової швидкості в динамічному режимі	1.09.2020 – 30.10.2020	
7	Аналіз отриманих результатів з внесенням їх в пояснювальну записку	30.10.2020 – 30.11.2020	
8	Створення стартап проекту за темою магістерської дисертації	30.11.2020 – 03.12.2020	
9	Оформлення дипломної роботи	03.12.2020 – 06.12.2020	

Студент _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Науковий керівник роботи _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 72 с., 1 ч., 22 табл., 34 рис., 40 джерел.

МАТЕРІАЛИ, InGaN, InAlN, КІНЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, ТРАНСПОРТНІ ВЛАСТИВОСТІ, ДРЕЙФОВА ШВИДКІСТЬ, ПРОЦЕСИ РОЗСІЮВАННЯ.

Актуальність теми дослідження обумовлена тим, що багато перспективних матеріалів лишаються без уваги, через нестачу дослідження їх властивостей.

Об'єктом дослідження – напівпровідникові матеріали InGaN та InAlN.

Предмет дослідження – часи релаксації, рухливість та дрейфова швидкість електронів в потрійних сполуках InGaN та InAlN.

Мета роботи – розрахунок, дослідження та аналіз рухливості електронів та поле-швидкісної характеристики потрійних сполук InGaN та InAlN.

Відповідно до обраної мети у першому розділі було проведено аналіз вже існуючих досліджень стосовно обраних матеріалів. Було проаналізовано зміну параметрів зі зміною вмісту індію в потрійних розчинах InGaN та InAlN. Серед проаналізованих параметрів: ширина забороненої зони; ефективна маса носіїв заряду; енергія фононів; діелектрична проникність; швидкість звуку та акустичний деформаційний потенціал.

У другому розділі було проведено аналіз та розрахунки кінетичних властивостей електронів в твердих розчинах InGaN та InAlN. В тому числі: рухливості електронів в слабких електричних полях; дрейфової швидкості в двох режимах роботи, при постійному та при імпульсному режимі електричного поля. Зроблено висновки, стосовно впливу вмісту індію в досліджуваних сполуках на дрейфову швидкість та рухливість електронів в досліджуваних матеріалах.

Третій розділ присвячений розробці стартап проекту відповідно до теми магістерської дисертації.

ABSTRACT

Master's thesis: 72 p., 1 h., 22 tab., 34 figures, 40 references.

MATERIALS, InGaN, InAlN, KINETIC PROPERTIES, TRANSPORT PROPERTIES, DRIFT SPEED, SCATTERING PROCESSES

The relevance of the research topic is due to the fact that many promising materials are ignored due to lack of research on their properties.

The object of research is InGaN and InAlN semiconductor materials.

The subject of research is relaxation times, mobility and electron drift velocity in ternary compounds InGaN and InAlN.

The purpose of the work is the calculation, research and analysis of electronics mobility and field–speed characteristics of compounds InGaN and InAlN.

In accordance with the chosen goal, the first section analyzed the existing research on selected materials. The change of parameters with the change of the content of ternary solution InGaN and InAlN was analyzed. Among the analyzed parameters: the width of the forbidden zone; effective mass of charge carriers; phonon energy; dielectric constant; speed of sound and acoustic deformation potential.

In the second section, the analysis and calculations of the kinetic properties of electrons in solid InGaN and InAlN solutions were performed. Including: electron mobility in weak electric fields; drift speed in two modes, at constant and dynamic electric field. Conclusions are made regarding the influence of the content of compounds on the drift velocity and mobility of the studied materials.

The third section is devoted to the development of a startup project in accordance with the theme of the master's thesis.

ЗМІСТ

ABSTRACT	6
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	9
ВСТУП	10
1.ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ	12
1.1 Кристалічна структура матеріалу.	12
1.2 Дисперсійні характеристики	15
1.3 Вихідні параметри	18
1.3.1 Заборонена зона	18
1.3.2 Міждолинна відстань	20
1.3.3 Ефективна маса носіїв заряду	21
1.3.2.1 Ефективна маса InGaN	21
1.3.2.2 Ефективна маса InAlN	22
1.3.4 Енергія фононів	23
1.3.5 Діелектрична проникність	24
1.3.6 Швидкість звуку та акустичний деформаційний потенціал	26
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ	28
2. АНАЛІЗ І РОЗРАХУНОК	29
2.1 Види і швидкість розсіювання.	29
2.1.1. Бінарні сполуки	32
2.1.2 Потрійні сполуки	34
2.2 Рухливість електронів	37
2.3 Дрейфова швидкість	40
2.3.1 При постійному електричному полі	40

2.3.2 Імпульсний режим електричного поля	43
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ	48
3. СТАРТАП ПРОЕКТ	50
3.1 Опис ідеї проекту	50
3.2 Технологічний аудит ідеї проекту	52
3.3 Аналіз ринкових можливостей стартап–проекту	52
3.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	60
3.5 Розроблення маркетингової програми стартап–проекту	63
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ	66
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	69
ДОДАТОК А	73

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

a_0 – радіус борівської орбіти, $a_0 = 0.53 \cdot 10^{-10}$ (м)

\hbar – стала Планка, $\hbar = 6.58 \cdot 10^{-16}$ (eV·с)

m_0 – ефективна маса спокою електрона, $m_0 = 9.11 \cdot 10^{-31}$ (кг)

m – ефективна маса густину станів

N_n – концентрація нейтральних домішків

N_d – концентрація домішок

$N_{\text{іон}}$ – концентрація іонізованих домішок

ΔE_d – енергія іонізації домішок

T – температура

k – стала Больцмана, $k = 8.62 \cdot 10^{-5}$ (eV/K)

N_c – ефективна густина станів в зоні провідності

ϵ – діелектрична проникність

ϵ_0 – діелектрична стала, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ (Ф/м)

e – заряд електрона, $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ (Кл)

ϵ_∞ – високочастотна діелектрична проникність

$\epsilon_{\text{ст}}$ – статична діелектрична проникність

K_0 – модифікована функція Бесселя другого роду нульового порядку

ω_0 – частота оптичних фононів

D_a – деформаційний акустичний потенціал;

$V_{\text{зв}}$ – швидкість звуку

ρ – густина речовини

ВСТУП

Ще в XX столітті широкого застосування в оптоелектроніці набули матеріали типу A_3B_5 , що пов'язано з особливим видом ковалентного зв'язку, а саме акцепторо–донорним. Особливу увагу слід приділити Нітридам, яким, на відміну від інших матеріалів A_3B_5 , притаманна гексагональна кристалічна модифікація. Така структура дозволяє використовувати Нітриди в якості випромінюючих приладів: світлодіодів та лазерів.

Однак, технологічні складності, пов'язані з вирощуванням кристалів Нітридів не дозволяли дослідникам точно визначити параметри та характеристики матеріалів. Так, перші дослідження показали, що ширина забороненої зони в InN зі структурою вюрциту близька до 2 еВ [2–7]. Проте, вже в роботах 2004–х років і пізніше [8–12] експериментально і теоретично виявили, що ширина забороненої зони в даному матеріалі близька до 0,7 еВ (експериментальні значення: 0,69).

Розвиток технологій відкрив нові можливості для використання матеріалів, проте досліджень їх характеристик і властивостей досить мало. Найбільш повно параметри матеріалів представлені в [13–15]. В роботі [16] представлено електричні власності матеріалів.

В роботі розглядаються потрібні сполуки нітридів $In_{1-x}Ga_xN$ та $In_{1-x}Al_xN$, в такому записі x – це параметр, що вказує на склад матеріалу. На сьогодні $InGaN$ активно використовуються в створенні світлодіодів, фототранзисторів, лазерів та сонячних елементів [17]. Прилади на основі $InAlN$ створюють діоди, транзистори та гетероструктури [18–21]. Прилади з $InAlN$ менш поширені за $InGaN$

Об'єктом дослідження – напівпровідникові матеріали $InGaN$ та $InAlN$.

Предмет дослідження – часи релаксації, рухливість та дрейфова швидкість електронів в потрібних сполуках $InGaN$ та $InAlN$.

Мета роботи – розрахунок, дослідження та аналіз рухливості електронів та поле швидкісної характеристики потрібних сполук $InGaN$ та $InAlN$.

Відповідно до обраної мети роботи поставлені наступні завдання:

- розглянути попередні дослідження стосовно обраних матеріалів.
- проаналізувати електричні властивості обраних матеріалів
- провести чисельні розрахунки кінетичних властивостей

Виконання цих завдань дає змогу зробити висновок про те, які матеріали є найкращими з точки зору швидкодії.

1. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Кристалічна структура матеріалу.

Для матеріалів A_3B_5 характерна структура кубічної ґратки (рис.1.1 а). Проте, нітриди виявляють властивості політипізму і можуть кристалізуватись не тільки в структурі сфалериту, но й структурі вюрциту (рис.1.1 б) [22,23]. Пунктирні лінії на малюнку поєднують пари катіонів і аніонів, що вказує на електростатичну силу, яка притягує їх один до одного. Вважається, що завдяки цій електростатичній силі структура вюрциту більш стійка ніж структура сфалериту.

Структура вюрциту, надає нітридам й інших унікальних властивостей, наприклад, вбудовані електричні поля через спонтанну і п'єзоелектричну поляризацію, висока енергія активації акцепторного (Mg) легування близько 170 меВ [10], що має вплив на рухливість носіїв заряду в матеріалах.

В роботах [24,25] вказано, що нітриду алюмінію також притаманна структура кам'яної солі (рис.1.1 с). Джерела [26] також надають інформацію про структуру кам'яної солі для всіх нітридних сполук. Однак на сьогодні, така модифікація все ще слабо вивчена. Відомостей про потрійні нітридні сполуки з кристалічною структурою кам'яної солі знайдено не було, можна зробити припущення, що для потрійних сполук така модифікація не притаманна. Тому наділі розглядати цю структуру не будемо.

В ґратках всіх типів кожний атом III групи знаходиться в оточенні тетраедру чотирьох атомів елементів V групи і навпаки (рис. 1.2) [27].

Будова першої координаційної сфери (тетраедр) в вюрциті, сфалериті і алмазі однакові, так як вони побудовані на основі щільних упаковок.

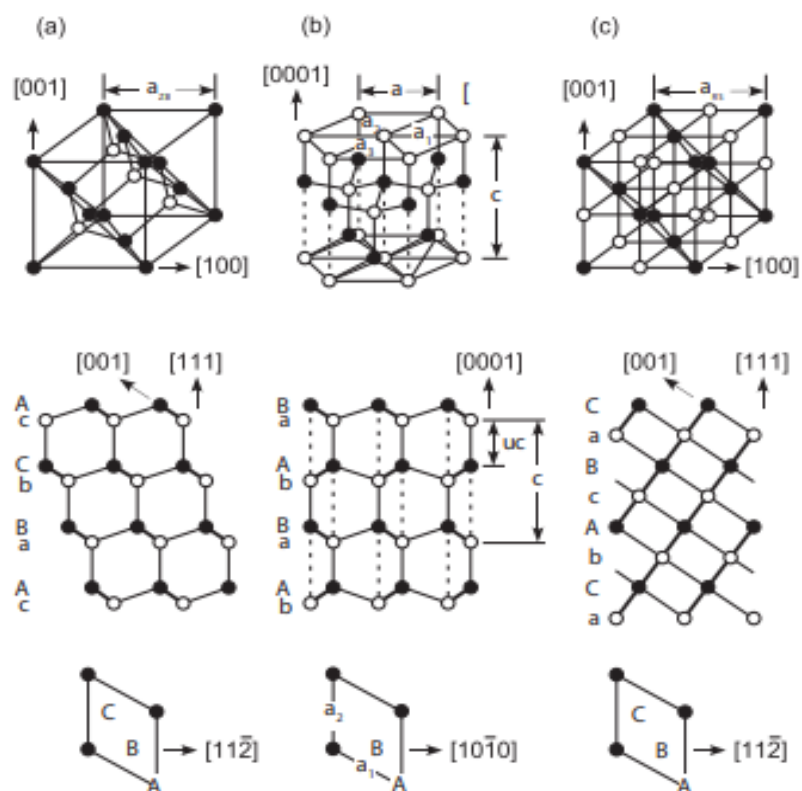


Рисунок 1.1 – Структура сфалериту(а), вюрциту(б) та кам'яної солі(с)

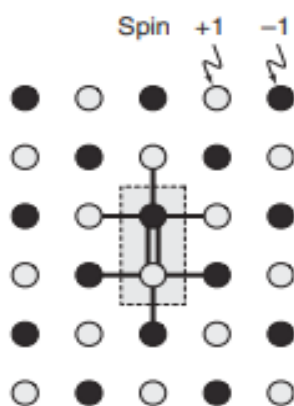


Рисунок 1.2 – Ковалентний зв'язок в нітридних сполуках [27]

Гратка типу сфалерит побудована за принципом алмазної, але друга гранецентрована кубічна гратка складається з атомів іншого сорту, гратка вісім разів примітивна. Для гранецентрованої кубічної гратки типу цинкової обманки перша зона Бріллюєна має форму октаєдра з зрізаними вершинами (рис. 1.3) [22].

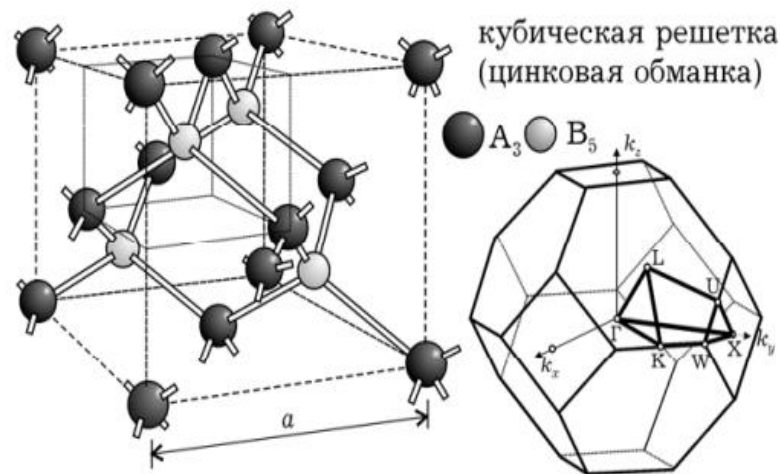


Рисунок 1.3 – Структура кубічної кристалічної ґратки, типу сфалерит(цинкова обманка) та форма першої зони Бріллюєна [22]

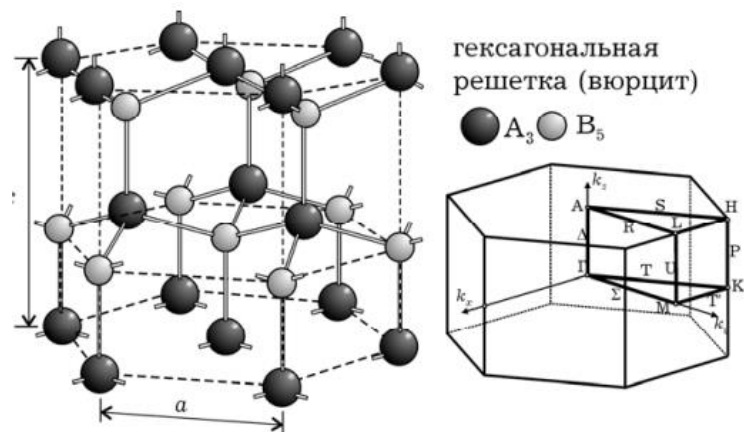


Рисунок 1.4 – Структура гексагональної кристалічної ґратки, типу вюрцит та форма першої зони Бріллюєна [27]

Ґратка вюрциту, як і сфалерит, може бути побудована з двох ґранецентрованих кубічних, вставлених один в одного за принципом тетраедричних координації. На відміну від сфалериту структура вюрциту не має центру симетрії (рис.1.4), що призводить до відмінностей в властивостях поверхонь, що впливає на процес виготовлення кристалу, ускладнюючи його [22]. Нітриди з вюрцитною модифікацією мають прямо зонну структуру, що дозволяє використовувати їх в якості випромінювачів світла [23].

1.2 Дисперсійні характеристики

Нітриди з різною кристалічною структурою відповідно мають різні дисперсійні криві, що вказує на певні відмінності в електричних властивостях матеріалів.

В кубічній ґратці нітриду галія в зоні Бріллюена розміщується Γ -, X - та L -долини (рис 1.5). Дну зони провідності відповідає Γ -долина, наступні шість X -долин розміщуються на енергетичній відстані 1,3eV на межі зони Бріллюена. Більш високі L -долини розміщуються на 2,3eV вище за Γ -долину. Для гексагональної структури кристалічної ґратки нітриду галію також характерно, що мінімум зони провідності розміщується в центрі зони Бріллюена. Но крім цього, в центрі розміщується ще одна Γ -долина, що вище першої приблизно на 2eV. Нажаль, на сьогодні, про долини, що розміщуються вище інформації досить мало, деякі вважають, що наступною долиною є A -долина, інші що наступна долина знаходиться між L та M точками. Відстань від дна зони провідності до рівня вакууму становить 4.1 eV. [22]

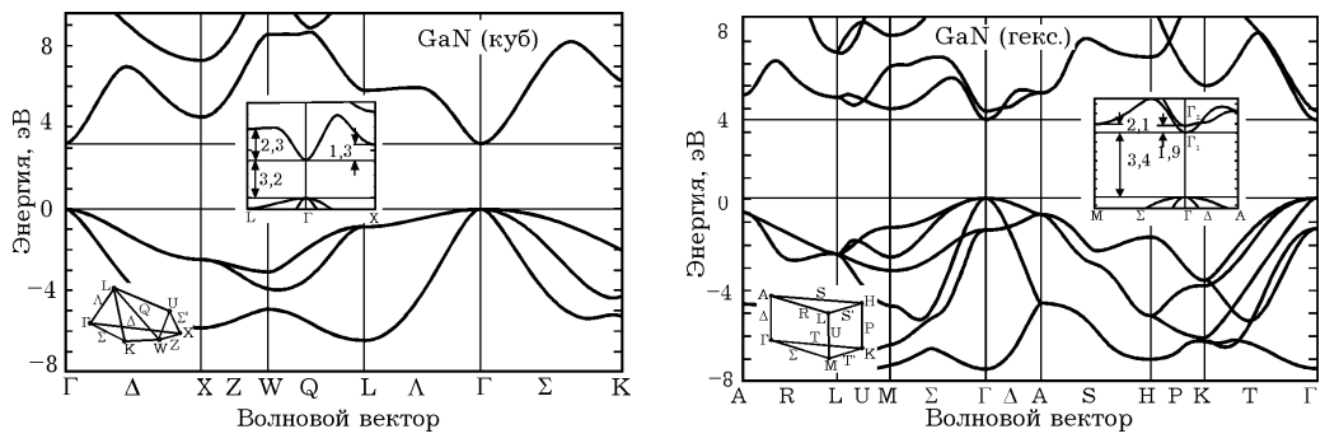


Рис.1.5 – Змодельовані закони дисперсії для GaN з кубічною та гексагональною структурою кристалічної ґратки [22]

Нітрид алюмінію з структурою сфалериту (рис.1.6) на відміну від нітриду галію є непрямоzonним провідником, центр зони провідності відповідає кристалічному напрямку[100] (X -долина) на відстані 4.9 eV від максимуму

валентної зони. Ширині забороненої зони відповідає центральна Γ -долина. На відстані 4 еВ від центральної Γ -долини розміщується ще 4 L-долини.

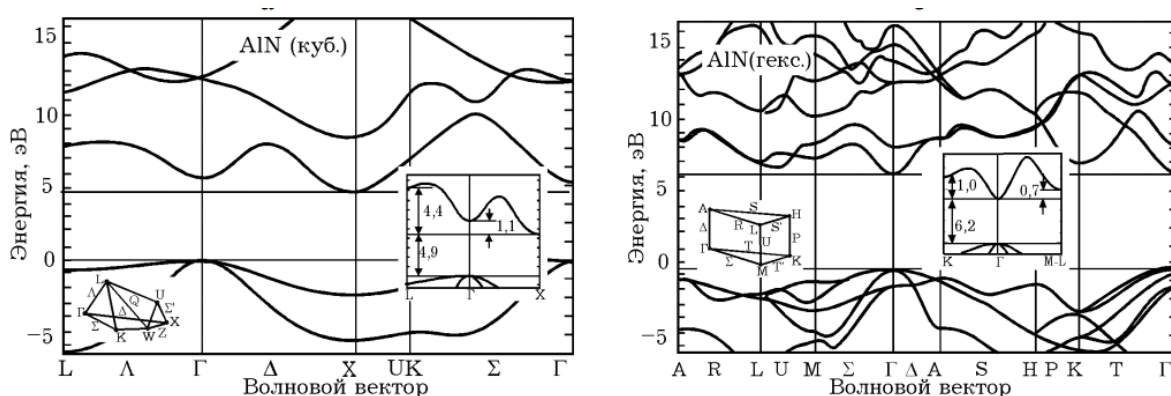


Рисунок 1.6 – Змодельовані закони дисперсії для AlN з кубічною та гексагональною структурою кристалічної ґратки [22]

Для типу вюрциту (рис.1.6) закон дисперсії нітриду алюмінію подібний до закону дисперсії нітриду галія. нітрид алюмінію з структурою вюрциту це прямозонний напівпровідник. В центрі зони Бріллюена розміщується Γ долина, на відстані в 0.7eV розміщується наступна L-M-долина. Також на межі зони Бріллюена розміщується шість еквівалентних K-долин. Відстань від дна зони провідності до рівня вакууму складає 0,6 еВ.

Нітрид Індію з кубічною структурою (рис. 1.7) є прямозонним напівпровідником і за структурою дисперсійної кривої подібний до кубічного нітриду галія. Йому характерна послідовність Γ -, X- та L- долин в зоні провідності. Абсолютний мінімум зони провідності розміщується в центрі зони Бріллюена (точка Γ). Наступна X-долина розміщується на відстані 0,57eV в середині зони Бріллюена.

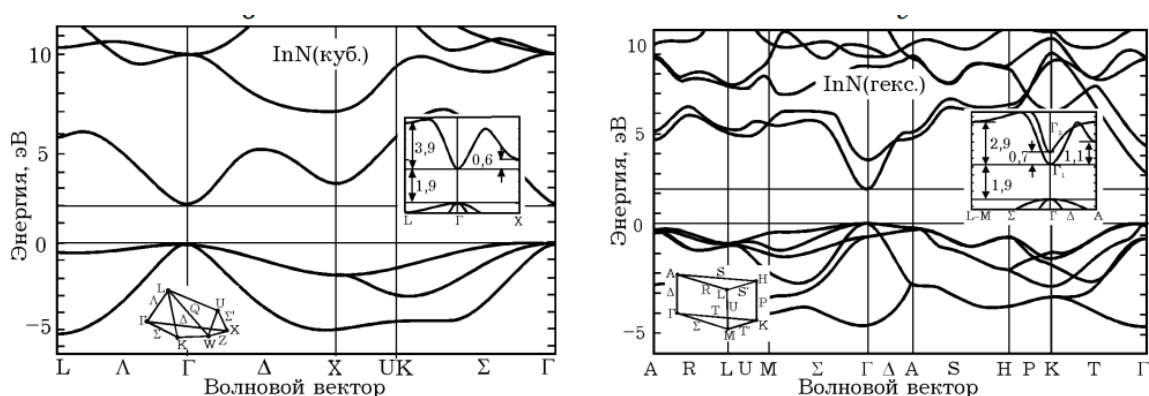


Рисунок .1.7 – Змодельовані закони дисперсії для InN з кубічною та гексагональною структурою кристалічної ґратки [22]

Для гексагонального індію нітриду дну зони провідності відповідає центральна Γ_1 -долина. Різні джерела дають різну інформацію стосовно наступної долини, це або А-долина, або ж Γ_2 -долина, обидві розміщуються в центрі зони Бріллюена. В зоні провідності також відмічають в більш високі долини, що лежать між точками L та M.

Для InN типу вюрцит знайдено і експериментально визначена крива дисперсії (рис.1.8) [26]. Як можемо побачити, згідно з експериментально отриманими дисперсійними кривими наступною долиною є А-долина.

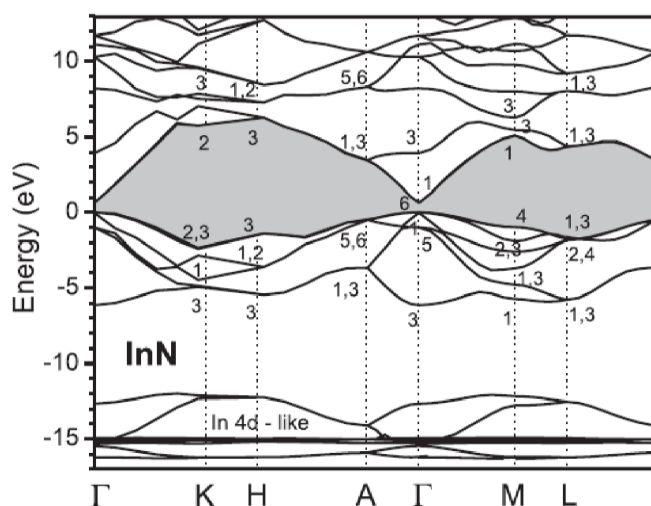


Рисунок .1.8 – Експериментально визначена крива дисперсії для InN.[14]

1.3 Вихідні параметри

Для знаходження невідомих параметрів потрійних сполук, що відповідають різним значенням x , в деяких випадках можна використовувати лінійну інтерполяцію між аналогічними величинами в бінарних сполуках.

Тож, важливим етапом дослідження є визначення параметрів бінарних сполук.

1.3.1 Заборонена зона

Один з найважливіших параметрів, що впливає з дисперсійних характеристик, це заборонена зона. Як вже згадувалось раніше, попередні досліджування визначили, що ширина забороненої зони в InN зі структурою вюрцита близька до 2 еВ [1–7]. Однак сучасні дослідники в експериментальних і теоретичних розрахунках [7–12] показали, що ширина забороненої зони в даному матеріалі близька до 0,7 еВ. (Експериментальні значення: 0,69). Згідно з проаналізованими матеріалами, значення забороненої зони в AlN складає 6,2 еВ[10,29], а в GaN 3,39 еВ[2,10,29].

Оскільки ширина забороненої зони для потрійних сполук $A_{1-x}B_xC$ залежить від їх складу, а саме від значення параметра x , в роботі [30] було запропоновано таку апроксимацію:

$$E_g(x) = (1 - x)E_g^{AC} + xE_g^{BC} - bx(1 - x),$$

де E_g^{AC} та E_g^{BC} це значення ширини забороненої зони для бінарних сполук з яких складається потрійна сполука $A_{1-x}B_xC$; b – коефіцієнт вигину функції.

Відповідно до мети розглядаємо сполуки $In_{1-x}Ga_xN$ та $In_{1-x}Al_xN$.

$$E_g^{InGaN}(x) = (1 - x)0.7 + x \cdot 3.39 - b \cdot x(1 - x),$$

$$E_g^{InAlN}(x) = (1 - x)0.7 + x \cdot 6.2 - b \cdot x(1 - x).$$

Для побудови використовувалися коефіцієнти вигину $b = 1.44$ і $b = 4.7$ для InGaN і InAlN відповідно. Дані значення найбільш близькі до знайдених експериментально [13] і при інтерполяції дають максимальний збіг ширині забороненої зони знайденої експериментально.

На основі цих даних на (рис.1.9) був побудований графік інтерполяції ширини забороненої зони для InGaN і InAlN в залежності від значення x .

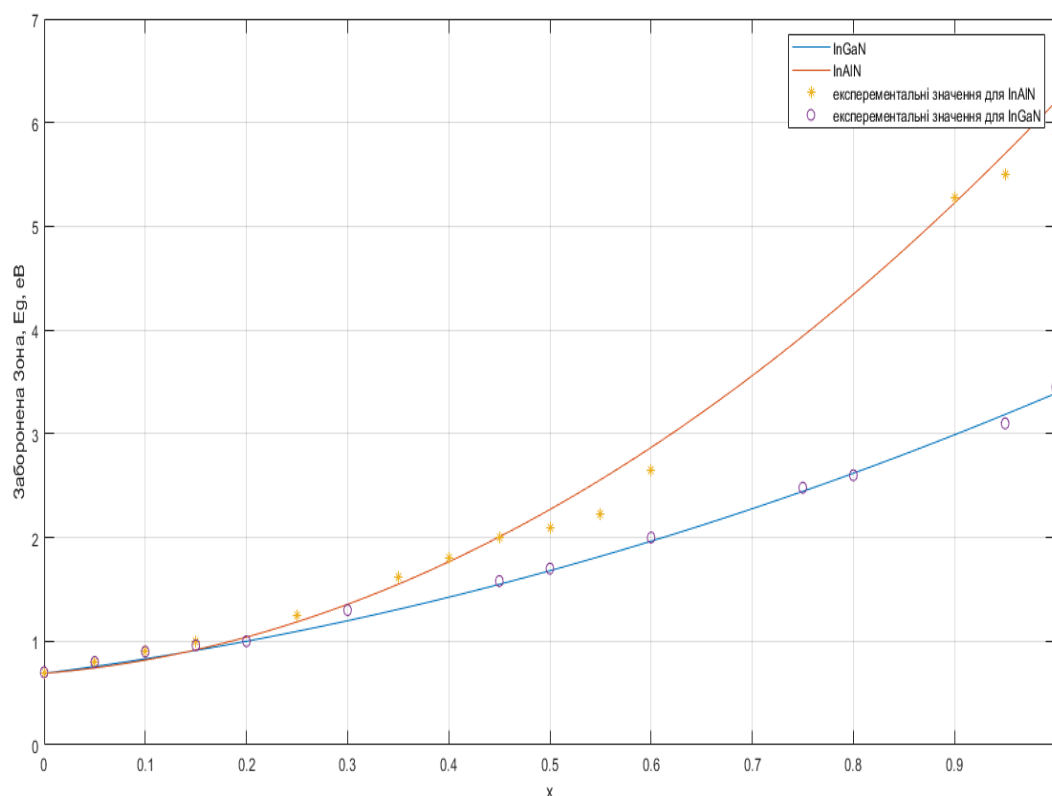


Рисунок 1.9 – Теоретичні та експериментальні[13] графіки залежності ширини забороненої зони залежно від параметру x , для твердих розчинів InGaN и InAlN

Отриманий графік гарно стикується з експериментальними даними викладеними в роботі [13].

1.3.2 Міждолинна відстань

Як продемонстровано вище, досліджуваним матеріалам притаманний різний вигляд законів дисперсії. Для потрійних сполук, зі змінною вмісту речовини буде відбуватися зсув дисперсійних кривих і відповідно зміна міждолинної відстані. Як вже зазначалось матеріали $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ та $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ можна розглядати як сплав нітриду індію та галію або алюмінію, відповідно. Зі змінною значення x дисперсійні характеристики будуть поступово змінюватись від значення характерного для чистого нітрду індію до нітрду галію(алюмінію). Для кожної долини такий зсув відбувається по різному [22].

Для спрощення розрахунків будемо розглядати дводолину модель, а отже зсув нижньої долин Γ -долина, та найближчої верхньої долини, яку обзначимо як L - долина.

Для гексагональної структури кристалічної ґратки нітриду галію мінімум зони провідності розміщується в центрі зони Бріллюена, відстань до верхньої долини сягає 0.57 eV[22].

Закон дисперсії нітриду алюмінію подібний до закону дисперсії нітриду галію. В центрі зони Бріллюена розміщується Γ долина, на відстані в 0.67eV розміщується наступна долина[22].

Для гексагонального індію нітриду дну зони провідності відповідає центральна Γ -долина. Згідно з знайденими експериментальними даними наступна долина розміщується вище на 1.1 eV[22].

При лінійній інтерполяції міждолинну відстань для різних значень x , можна знайти за формулами[31]:

$$\text{Для } \text{InGaN} - \Delta_{\Gamma L} = 0.57(1 - x) + 1.1x$$

$$\text{Для } \text{InAlN} - \Delta_{\Gamma L} = 0.57(1 - x) + 0.7x$$

1.3.3 Ефективна маса носіїв заряду

Згідно з [31], ефективну масу для потрійних сполук $A_xB_{1-x}C$ можна знайти за інтерполяційною формулою:

$$m_{AB}(x) = xm_A + (1 - x)m_B ,$$

де m_A ефективна маса для бінарної сполуки AC та m_B відповідно ефективна маса бінарної сполуки BC.

1.3.2.1 Ефективна маса InGaN

Матеріал InGaN слід розглядати як поєднання двох матеріалів InN та GaN. В такому випадку, формула набуває вигляду:

$$m_{InGaN}(x) = xm_{InN} + (1 - x)m_{GaN} ,$$

де m_{InN} та m_{GaN} ефективні маси бінарних сполук InN та GaN.

Ефективна маса густини станів в Γ –долин для InN складає 0.07 [29], для GaN наводять значення 0.22 [10,29]. Для найближчої верхньої долини, яку обозначимо як L–долина, значення ефективної маси густини станів становить для InN 1.08[3] та 0.35 для GaN [10]. Підставивши значення параметрів, для бінарних сполук, отримаємо функцію для Γ –долини[31]:

$$m_{InGaN}(x) = 0.07x + 0.39(1 - x)$$

Для L–долини:

$$m_{InGaN}(x) = 1.9x + 3.28(1 - x)$$

З використанням даної функції, було побудовано залежність ефективної маси на (рис 1.10).

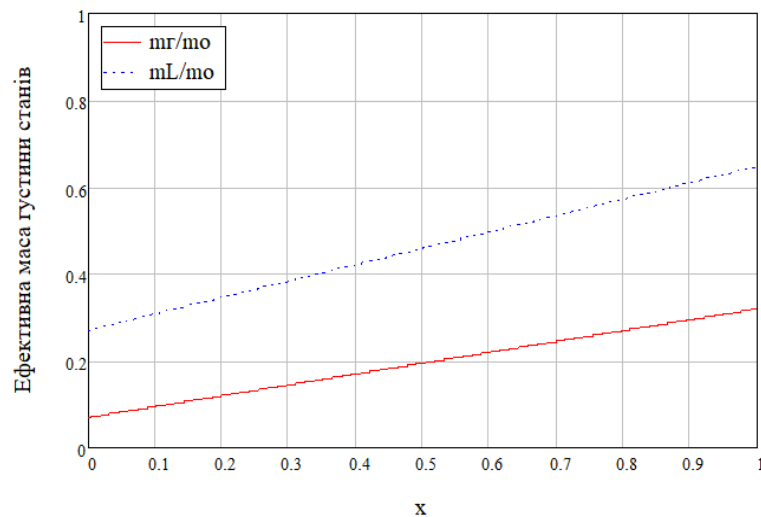


Рисунок .1.10 – Залежність ефективної маси в Γ – та L– долині та для InGaN кристалічної структури типу вюрцит від значення x. Теоретично змодельовані та експериментальні [31] дані

Дана апроксимація допускає, що значення ефективної маси електронів змінюється лінійно зі зміною складу речовини.

1.3.2.2 Ефективна маса InAlN

Аналогічно до InGaN, для розрахунку ефективної маси InAlN, його розглядають як лінійну апроксимацію між значеннями бінарних сполук InN та AlN.

$$m_{\text{InAlN}}(x) = xm_{\text{InN}} + (1 - x)m_{\text{AlN}} ,$$

де m_{InN} та m_{AlN} ефективні маси бінарних сполук InN та AlN.

Як зазначалось в попередньому розділі ефективна маса густини станів для Γ – та L–долини в InN становить 0.07 [29] та 1,08 [3], відповідно. Для AlN були знайдені значення 0.22 [29] та 0,35[3] , для Γ – та L–долини відповідно.

Підставивши значення отримаємо функцію для Γ –долини[31]:

$$m_{\text{InAlN}}(x) = 0.07(1 - x) + 0.22x$$

Для L–долини

$$m_{\text{InAlN}}(x) = 0.45x + 3.28(1 - x)$$

З використанням даної функції, було побудовано залежність ефективної маси на (рис 1.11).

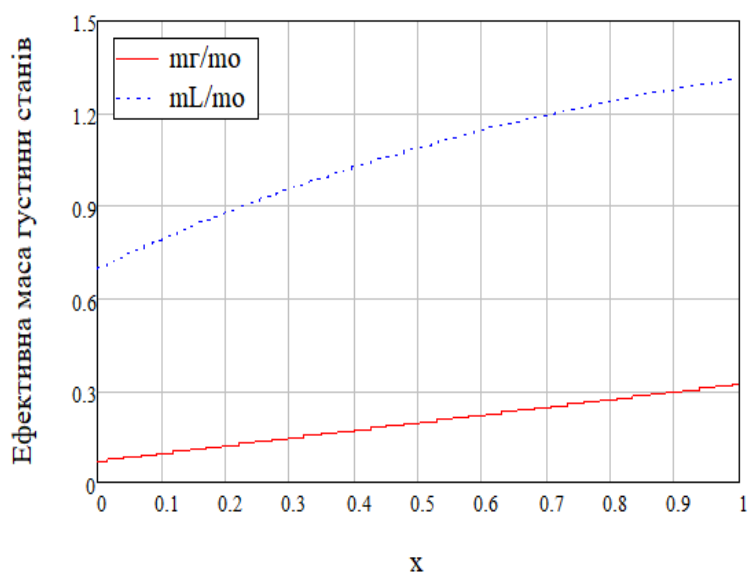


Рисунок .1.11 – Залежність ефективної маси в Γ – та L – долині та для InAlN кристалічної структури типу вюрцит від значення x . Теоретично змодельовані та експериментальні [31]

Аналогічно до результатів отриманих для InGaN, зі зменшенням вмісту індію ефективна маса зростає.

1.3.4 Енергія фононів

Більшість потрійних сполук демонструють двухмодову поведінку фононів, однак нітридні сполуки InGaN та InAlN, на відміну від інших, демонструють одномодову поведінку.

Згідно з [31] для розрахунку енергії оптичних фононів в InGaN можна використати формулу: $\omega_{LO}(x) = 736(1 - x) + 588x$.

Для InAlN : $\omega_{LO}(x) = 890(1 - x) + 588x$.

Оскільки більшість експериментальних даних, було знайдено для частоти оптичних фононів, для підтвердження отриманих даних було побудовано графік залежності частоти оптичних фононів від x (рис. 1.12), експериментальні значення представлено в роботах [29,31–32].

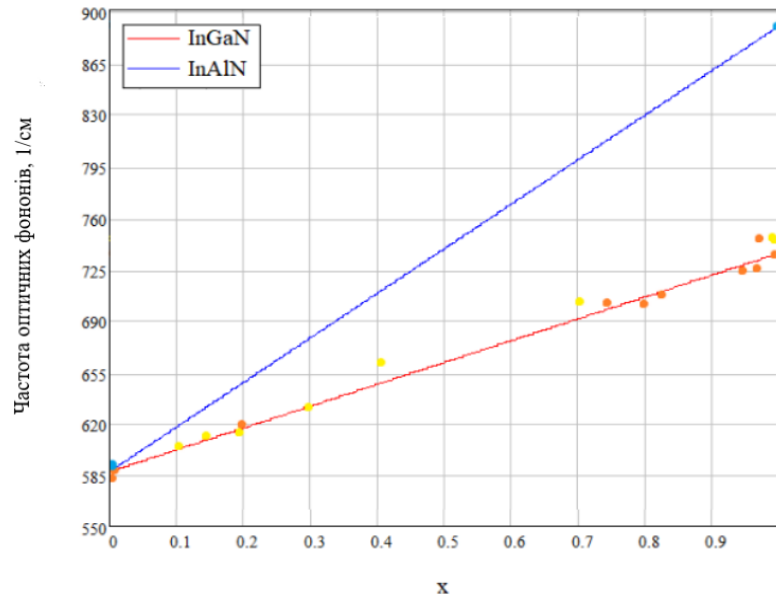


Рисунок 1.12.— Частота оптичних фононів – розрахунки та експериментальні значення [29,31–32]

Однак для подальших розрахунків, відповідно до завдання, застосовувались значення енергії оптичних фононів в еВ. Що було розраховано за формулою:

$$E = \hbar \cdot \omega,$$

де \hbar – стала Планка, що дорівнює $6,58 \cdot 10^{-16}$ (еВ·с), ω – частота фононів.

1.3.5 Діелектрична проникність

Про діелектричну проникність в твердих розчинах InGaN та InAlN відомостей досить мало, для розрахунків були використані значення, отриманні шляхом лінійної інтерполяції.

Для цього використовувались формули [31]:

$$\varepsilon(0)^{\text{InGaN}} = 15.3(1 - x) + 6.4x,$$

$$\varepsilon(\infty)^{\text{InGaN}} = 9.3(1-x) + 3.95x,$$

$$\varepsilon(0)^{\text{InAlN}} = 15.3(1-x) + 6.8x,$$

$$\varepsilon(\infty)^{\text{InAlN}} = 9.3(1-x) + 4.7x.$$

де $\varepsilon(0)$ – статична, а $\varepsilon(\infty)$ – високочастотна діелектрична проникність

На (рис 1.13) та (рис 1.14) побудовано графіки залежності діелектричної проникності для InAlN та InGaN відповідно.

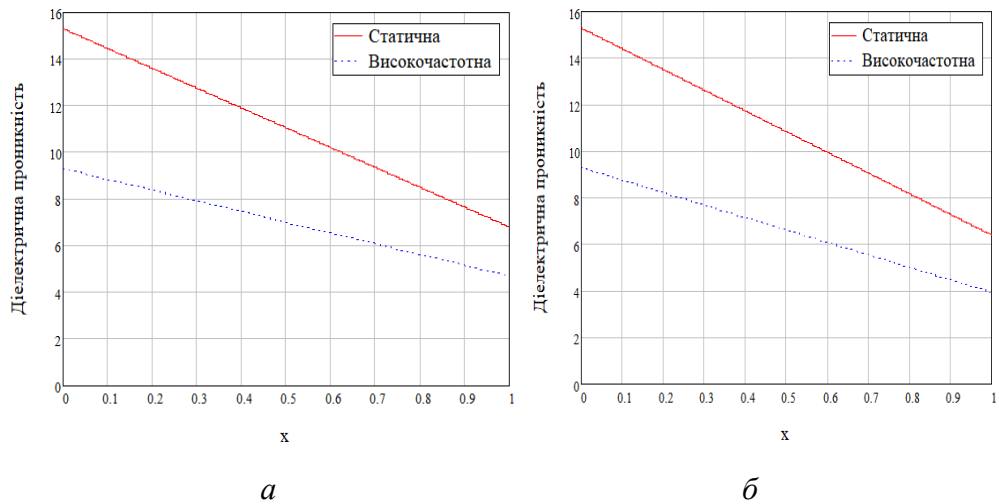


Рисунок .1.13 – Діелектрична проникність для а -InAlN б- InGaN

Значення $x=0$ відповідає діелектричній проникності в InN, тобто 15,3[10–11,29,23] для статичної та 9,3[29] для високочастотної.

Для AlN значення високочастотної діелектричної проникності становить 4,84 [11,23], а статичної 9,14 [11].

Для GaN значення високочастотної діелектричної проникності становить 5,35, а статичної 8,9[23,30,328].

1.3.6 Швидкість звуку та акустичний деформаційний потенціал

Для розрахунку акустичного розсіювання необхідно визначити швидкість звуку в кристалах InAlN та InGaN та акустичний деформаційний потенціал.

Для цього скористаємось функціями [31] :

$$V_{зв}^{InGaN} = 5.28(1 - x) + 9.06x$$

$$V_{зв}^{InAlN} = 5.28(1 - x) + 6.56x$$

За наведеними формулами розраховано та побудовано графік залежності швидкості звуку від x (рис 1.14).

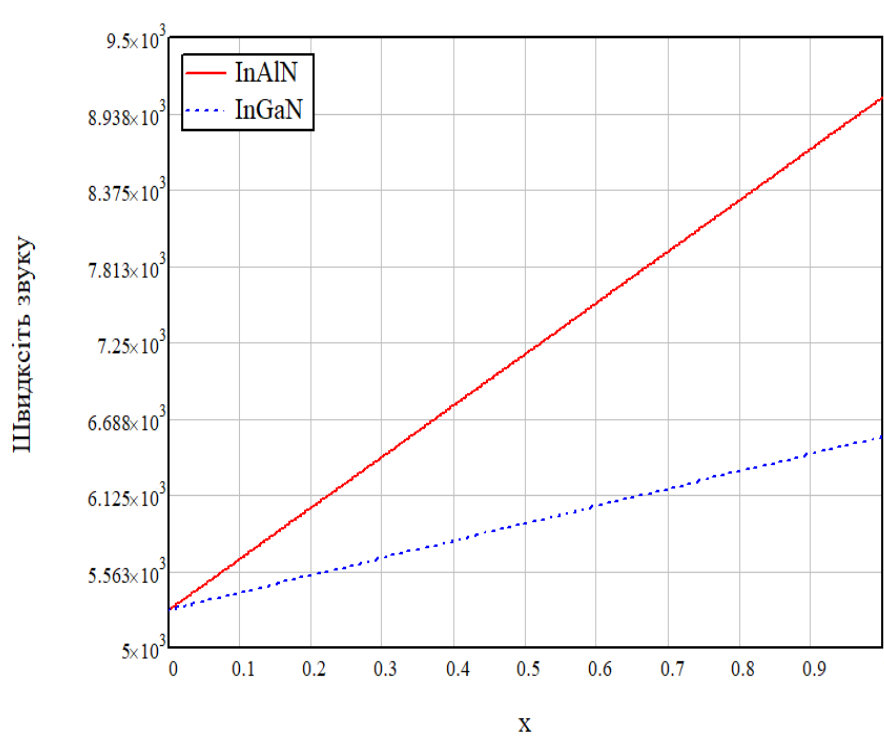


Рисунок .1.14 – Теоретично розрахована швидкість звуку в твердих розчинах InAlN та InGaN в залежності від x

Для розрахунку акустичного деформаційного потенціалу застосовували формули [31]:

$$D_a^{InGaN} = 7.1 + 1.28x$$

$$D_a^{\text{InAlN}} = 7.1 + 2.4x$$

Результат розрахунків представлено графічно (рис. 1.15) в вигляді графіку залежності акустичного деформаційного потенціалу від x .

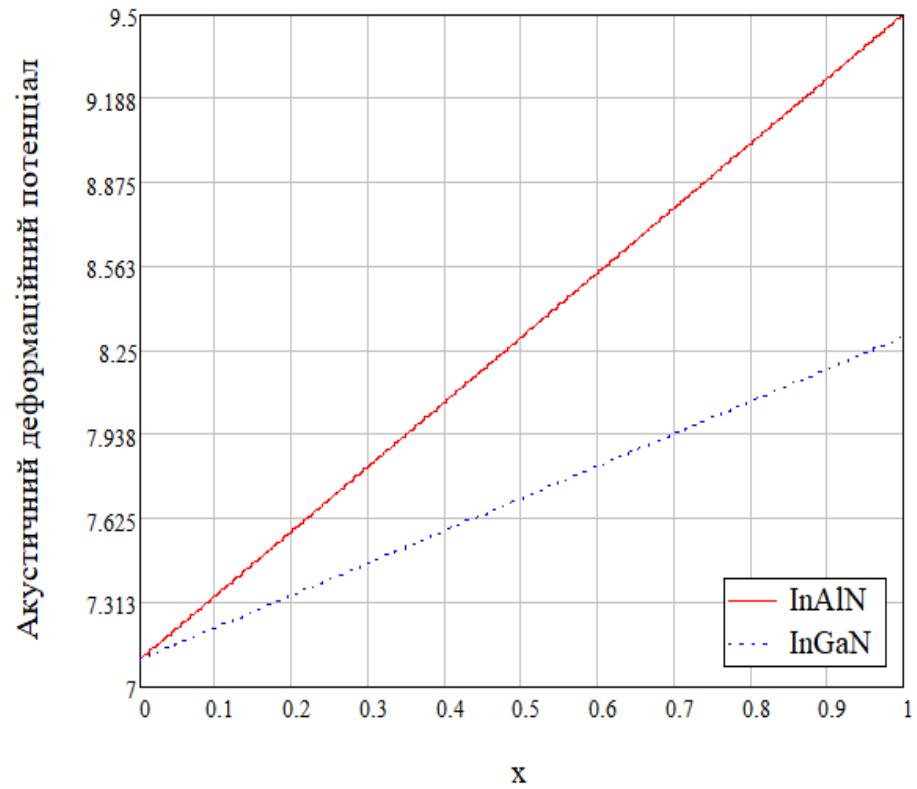


Рисунок .1.15 – Теоретично розрахований акустичний деформаційний потенціал в твердих розчинах InAlN та InGaN в залежності від x

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

Згідно з проведеним аналізом, для нітридних матеріалів є характерним політипізм, вони можуть набувати трьох типів кристалічних структур, а саме: кубічна ґратка (сфалерит), гексагональна ґратка (вюрцит) та структура кам'яної солі.

Про структуру кам'яної солі на сьогодні відомостей порівняно мало, тому було вирішено звернути увагу на інші кристалічні модифікації.

Було обрано модифікацію типу вюрцит, оскільки серед матеріалів типу A_3B_5 вона притаманна тільки нітридам.

В даному розділі було проведено визначення параметрів: заборонена зона; ефективна маса; енергія фононів; діелектрична проникність; швидкість звуку та акустичний деформаційний потенціал, в залежності від складу досліджуваних потрійних сполук.

Найбільш повно параметри бінарних сполук представлені в літературних джерелах [2–4,13–16,23,31,33]. Обрані для подальшого дослідження параметри бінарних сполук представлено в Додатку А. Більшість параметрів наведених у таблиці близькі до значень, знайдених експериментально в роботах [10, 33–34].

Серед проаналізованих джерел найбільші відмінності в параметрах спостерігалися для InN , що ймовірно, пов'язано з недостатньо точним визначенням ширини забороненої зони на ранніх етапах досліджень. Неточність, також, можна пояснити складністю технологічного процесу отримання кристалів.

На основі вихідних параметрів для бінарних сполук, з використанням модельних залежностей, запропонованих в роботах [22–24], було побудовано графіки залежностей параметрів від вмісту індію сполуках. Для більшості параметрів, для обох матеріалів зберігається тенденція, що зі зменшенням вмісту індію, значення параметру збільшується. Серед проаналізованих параметрів, лише значення діелектричної проникності змінюється протилежним чином. Тобто зі зменшенням вмісту індію, значення діелектричної проникності збільшується.

2. АНАЛІЗ І РОЗРАХУНОК

2.1 Види і швидкість розсіювання.

Згідно з квантовою теорією розсіювання транспортні властивості носіїв заряду в матеріалах визначаються не тільки зовнішніми силами, але й особливостями механізмів взаємодій, що призводять до розсіювання спрямованого потоку носіїв заряду[22].

Дослідники класифікують механізми розсіювання на види:

1. Домішкове

1.1. На нейтральних атомах домішки

1.2. На іонах домішки

2. Фононе

2.1. Оптичне

2.2. Акустичне

2.3. Міждолине

Зворотний час релаксації імпульсу на нейтральних атомах домішках пропорційна їх концентрації і радіусу першої борівської орбіти [35, 36]. Цей тип розсіювання відбувається при найнижчих температурах ґратки.

Для розрахунку швидкості розсіювання на нейтральних атомах домішках запропоновано формулу [22]:

$$\lambda = \frac{0.21 \cdot \hbar \cdot N_n \cdot a_0 \cdot \epsilon \cdot \frac{m_0}{m}}{m}, \quad (1)$$

де a_0 – радіус найближчої до атому орбіти електрона, борівський радіус.

$a_0 = 0.53 \cdot 10^{-10}$ (м);

\hbar – стала Планка, $\hbar = 6.58 \cdot 10^{-16}$ (еВ·с);

m_0 – ефективна маса спокою електрона, $m_0 = 9.11 \cdot 10^{-31}$ (кг);

m – ефективна маса густини станів;

N_n – концентрація нейтральних атомів домішки, $N_n = N_d - N_{ion}$;

N_d – концентрація домішок;

ϵ – діелектрична проникність;

N_{ion} – концентрація іонів домішки,

$$N_{ion} = \frac{N_d}{\sqrt{\frac{N_d}{N_c \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_d \cdot (1 - N_d \cdot 10^{-8})}{k \cdot T}\right)} + \frac{1}{4}} + \frac{1}{2}}$$

ΔE_d – енергія іонізації домішки

T – температура;

k – стала Больцмана, $k = 8.62 \cdot 10^{-5}(\text{eV/K})$;

N_c – ефективна густина станів в зоні провідності, $N_c = 2 \cdot \left(\frac{m \cdot k \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot \hbar^2}\right)^2$

Для розрахунку швидкості розсіювання на іонізованих атомах домішки, існує дві моделі, модель Брукса–Херрінга та модель Конуелл–Вайскопфа. В моделі Брукса–Херрінга область дії поля домішкового іона обмежується його екрануванням полем носія заряду.

В такому випадку зворотний час релаксації імпульсу визначається співвідношенням [35]:

$$\lambda_{ion} = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi}{m}} \cdot \left(\frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0}\right)^2 \cdot N_{ion} \cdot (k \cdot T)^{-\frac{3}{2}} \cdot \left(\ln(1 + \eta) - \frac{\eta}{1 + \eta}\right), \quad (2)$$

де ϵ_0 – діелектрична стала, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}(\text{Ф/м})$;

e – заряд електрона, $e = 1.6 \cdot 10^{-19}(\text{Кл})$;

$$\eta = \frac{12 \cdot m \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot (k \cdot T)^2}{e^2 \cdot \hbar^2 \cdot N_{ion}}. \quad (3)$$

Зворотний час релаксації імпульсу на іонізованих домішках в моделі Конуелл–Вайскопфа описується формулою [35]:

$$\lambda_{\text{ion}} = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi}{m}} \cdot \left(\frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \right)^2 \cdot N_{\text{ion}} \cdot (k \cdot T)^{-\frac{3}{2}} \cdot \ln \left(1 + \frac{6 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot k \cdot T}{e^2 \cdot N_{\text{ion}}^{\frac{1}{3}}} \right), \quad (4)$$

Модель Конуелл–Вайскопфа обмежує поле дії іона домішки половиною середньої відстані між іонами.

Для оцінки розсіювання на іонах домішки розраховувалась зворотний час релаксації імпульсу за обома моделями та використовувалось усереднене значення.

Зворотний час релаксації імпульсу для акустичних фононів визначається виразом

$$\lambda_{\text{ак}} = \frac{\sqrt{3} \cdot m^{\frac{3}{2}} \cdot D_a^2 \cdot k^{1.5} \cdot T^{1.5}}{\pi \cdot \hbar^4 \cdot \rho \cdot v_{\text{зв}}^2}, \quad (5)$$

де, D_a – деформаційний акустичний потенціал;

$v_{\text{зв}}$ – швидкість звуку

ρ – густина речовини.

Швидкість розсіюванні при полярному оптичному розсіювання, розраховують за формулою (6) [35].

$$\lambda_{\text{po}}^{\pm} = \frac{e^2 \cdot \sqrt{m \omega_0}}{4 \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \hbar^{3/2}} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{\infty}} - \frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{\hbar \omega_0}{2 \cdot k \cdot T}} \cdot \text{ch}\left(\frac{\hbar \omega_0}{2 \cdot k \cdot T}\right) \cdot \text{Ko}\left(\frac{\hbar \omega_0}{2 \cdot k \cdot T}\right), \quad (6)$$

де ε_{∞} – високочастотна діелектрична проникність,

$\varepsilon_{\text{ст}}$ – статична діелектрична проникність,

Ko – модифікована функція Бесселя другого роду нульового порядку

ω_0 – частота оптичних фононів.

Існують і інші види розсіювання, наприклад, розсіювання на сплавному потенціалі та електрон–електронне розсіювання. При певних умовах вони можуть мати значний вплив, однак, в даній роботі, для спрощення розрахунків вони не розглядались.

2.1.1. Бінарні сполуки

Чисельне моделювання механізмів розсіювання проводилося на основі дводолинної (GL) моделі для слабкого електричного поля, при якій температура електронів практично дорівнює температурі ґратки.

Оскільки потрібні сполуки, що досліджуються можна розглядати, як сплав відповідних бінарних сполук, в ході роботи було розраховано швидкості розсіювання бінарних сполук InN, GaN та AlN.

Результати моделювання температурної залежності зворотного часу релаксації імпульсу для описаних в попередньому розділі типів розсіювання представлені на (рис. 2.1) для InN, на (рис. 2.2) для GaN та (рис. 2.3) для AlN.

Розсіювання на іонах домішки вносить значний вклад при низьких температурах (до 200K) і проявляється в хаотизації руху носіїв заряду без зміни їх енергії.

Як можна бачити (див. рис.2.1, рис. 2.2 та рис. 2.3) найбільший пік зворотного часу релаксації імпульсу відповідає AlN, а найменша InN. Однак зі збільшенням температури ситуація дещо змінюється, так при 300K та за концентрацією домішок 10^{23} м^{-3} сумарний зворотний час релаксації імпульсу для InN складає $7.8 \cdot 10^{12} \text{ (1/с)}$, для AlN вона сягає $2.1 \cdot 10^{13} \text{ (1/с)}$, а для GaN $2.8 \cdot 10^{13} \text{ (1/с)}$.

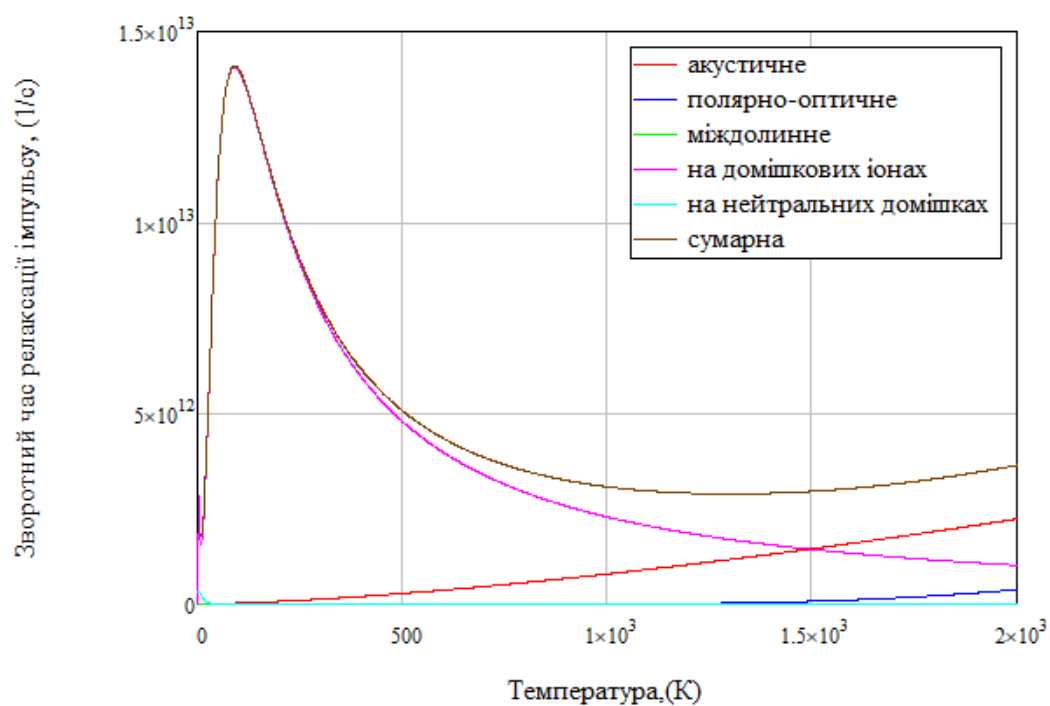


Рисунок . 2.1 – Зворотний час релаксації імпульсу для InN в залежності від температури

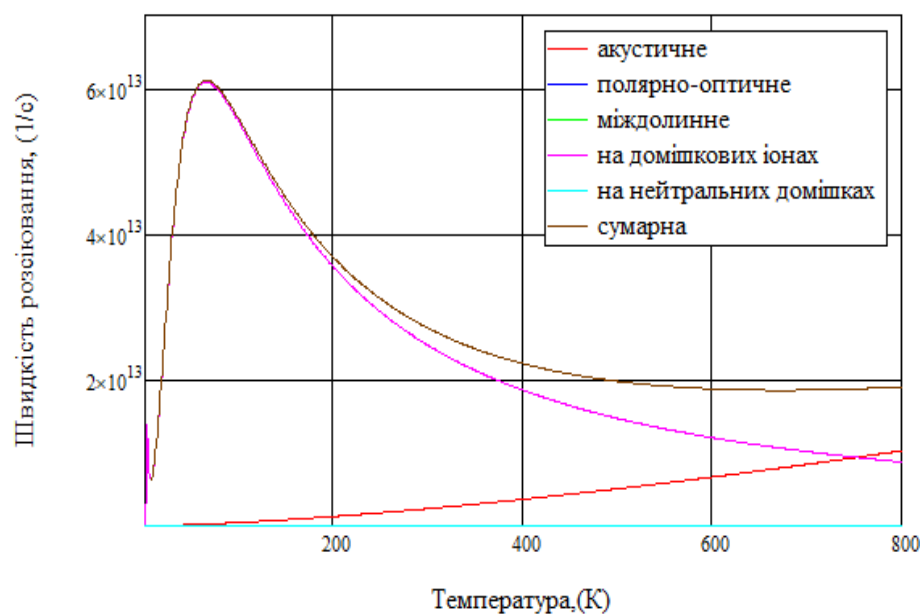


Рисунок . 2.2 Зворотний час релаксації імпульсу для AlN в залежності від температури

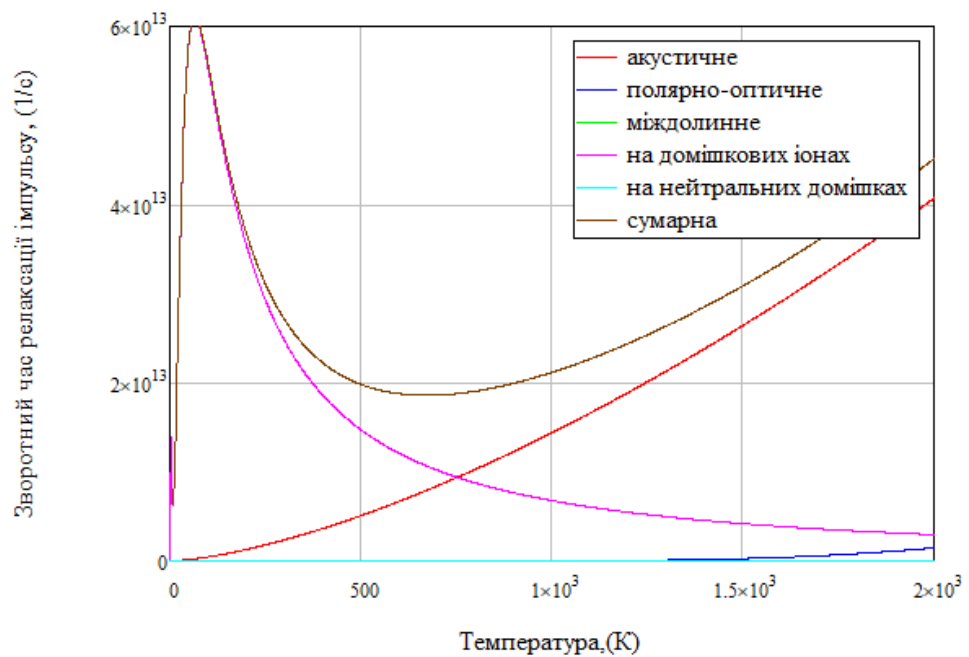


Рисунок . 2.3. Зворотний час релаксації імпульсу для GaN в залежності від температури

На основі отриманих залежностей, можна зробити висновок, що найменший час релаксації імпульсу відповідає GaN, тобто серед нітридних сполук, він демонструє найбільшу швидкодію в слабких електричних полях.

2.1.2 Потрійні сполуки

Використовуючи формули надані в розділі 2.1 було побудовано температурну залежність зворотного часу релаксації імпульсу для потрійних сполук InGaN та InAlN. Щоб відобразити, як зміна складу потрійної сполуки впливає на зворотний час релаксації імпульсу представлено результати моделювання для чотирьох значень параметру x (рис. 2.4 та рис. 2. 5).

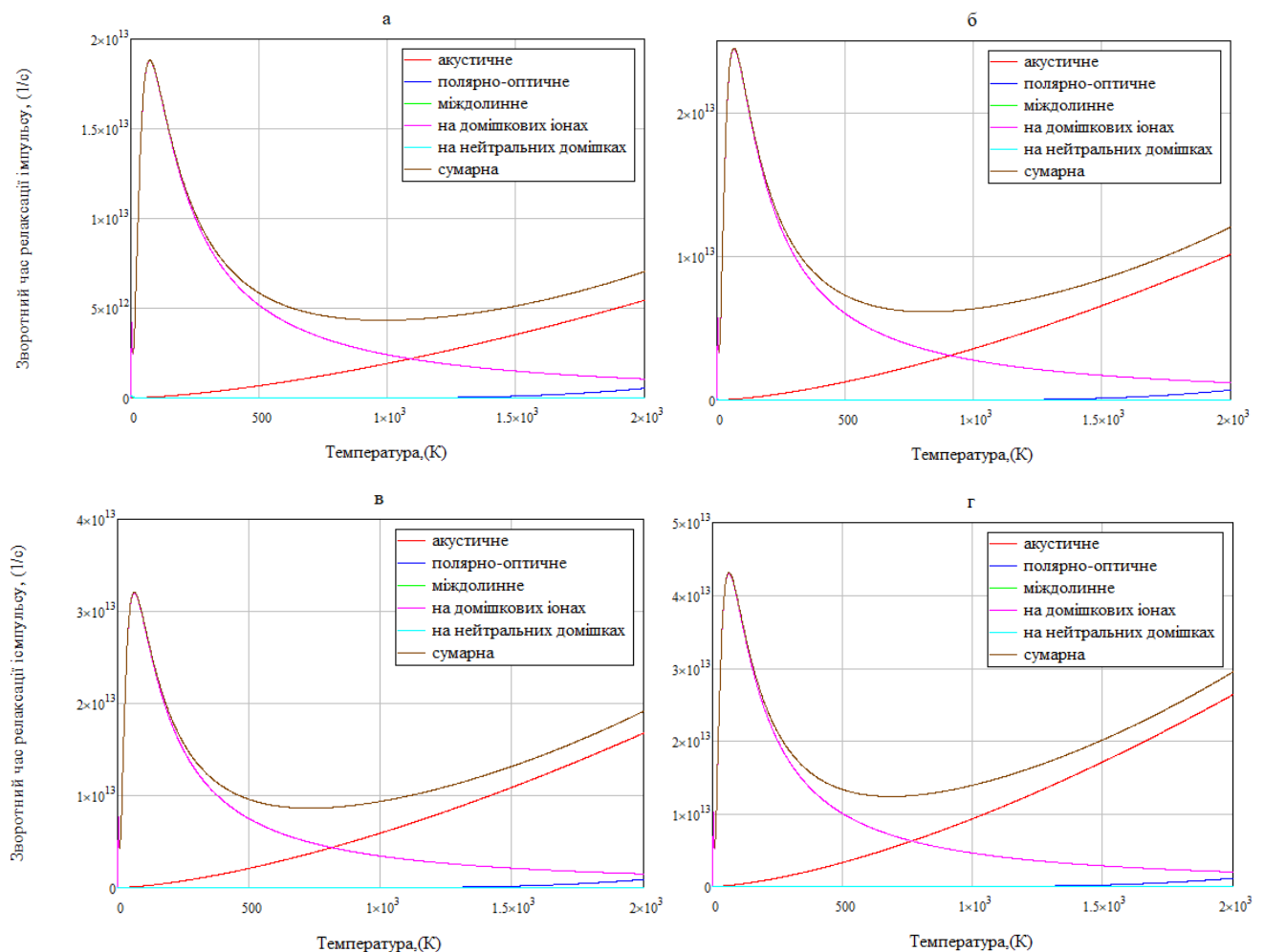


Рисунок .2.4 – Механізми розсіювання для InGaN, де а – при $x=0.2$, б – при $x=0.4$, в – при $x=0.6$ та г – при $x=0.8$

З представлених результатів слід: при низьких температурах домінує домішкове розсіювання; при найнижчих температурах – на нейтральних домішкових атомах, при збільшенні температури до 300–400 К домінує розсіювання на іонізованих атомах домішки. Акустичне розсіювання проявляється на початку низьких температур і вносить істотний внесок в загальний час релаксації. При температурах вище 700–800К, акустичне розсіювання стає домінуючим. Міждолинне та полярне оптичне розсіювання практично не проявляють себе, в даному діапазоні температур, їх внесок незначний. Така тенденція зберігається незалежно від значення x .

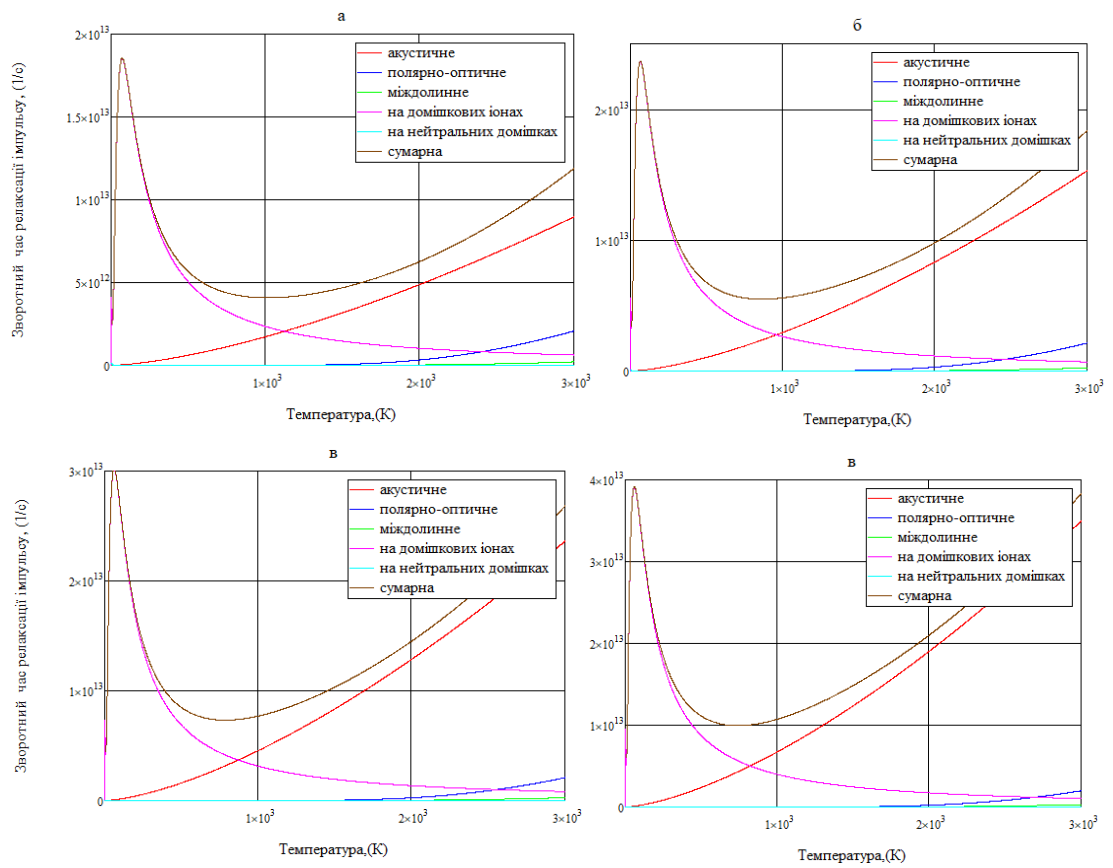


Рис 2.5 – Механізми розсіювання для InAlN, де а – при $x=0.2$, б – при $x=0.4$,
в – при $x=0.6$ та г – при $x=0.8$

На (рис. 2.5) представлена залежність часу релаксації імпульсу від температури для різних значень x .

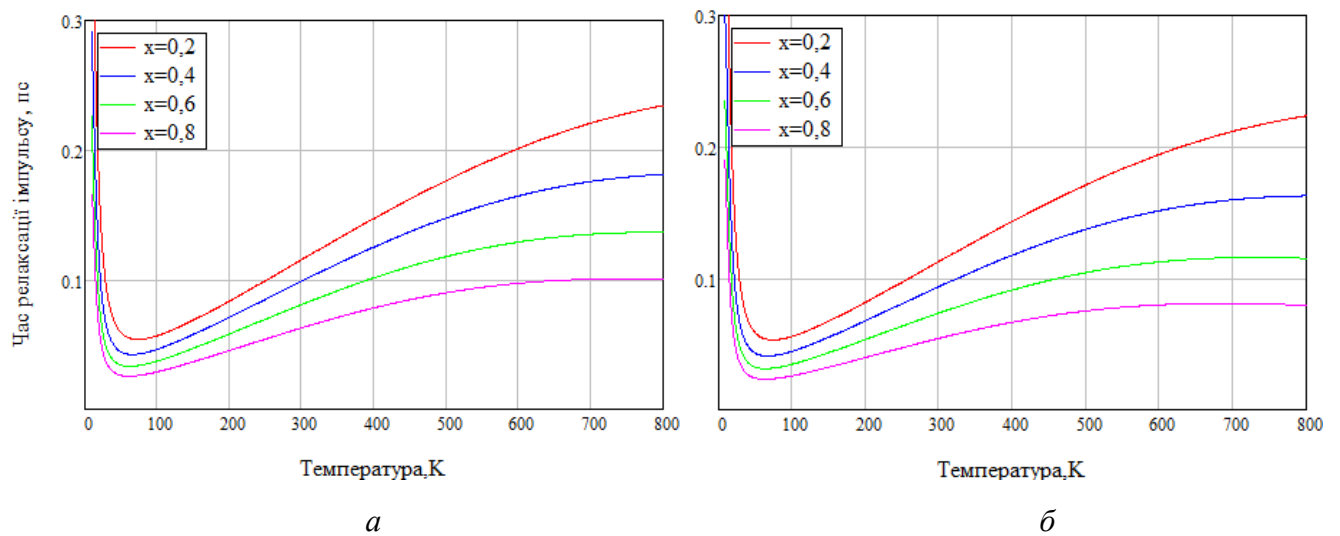


Рисунок 2.6 – Час релаксації імпульсу від температури для різних значень x , а – InAlN, б – InGaN

Згідно з отриманими графіками температурної залежності часу релаксації імпульсу при температурах до 300K різниця між InAlN та InGaN при однакових значеннях x незначна, проте вже при 300K можна помітити, що час релаксації імпульсу в InGaN менший за InAlN і зі збільшенням температури різниця зростає. Наприклад, при $x = 0.4$ час релаксації імпульсу в InGaN сягає 0.093 пс, а в InAlN 0.098 пс, а при $x=0.8$ в InGaN – 0.054 пс, в InAlN 0.062 пс. При збільшенні вмісту індію в сполуках час релаксації імпульсу збільшується. Отже, для збільшення швидкодії вміст індію необхідно зменшувати.

2.2 Рухливість електронів

Основним параметром для визначення динаміки електричних процесів в матеріалах є рухливість носіїв заряду. Рухливість носіїв заряду в матеріалах визначається особливостями механізмів розсіювання й деталями зонної структури матеріалів, та характеризує здатність електронів або дірок реагувати на зовнішні чинники.

Для розрахунку скористаємось формулами[25]:

$$\mu_{\Gamma} = \frac{\tau_{\Gamma} \cdot e}{m_{c\Gamma}}$$

$$\mu_L = \frac{\tau_L \cdot e}{m_{cL}}$$

де μ_{Γ} , μ_L – рухливість носіїв заряду в Γ та L – долині відповідно;

τ_{Γ} та τ_L – час релаксації імпульсу в Γ та L – долині відповідно;

$m_{c\Gamma}$ та m_{cL} – омічна ефективна маса в Γ – та L – долини відповідно.

Оскільки, на сьогодні досить багато відомостей саме про бінарні сполуки, на (рис 2.7) було проведено верифікацію результатів моделювання. Для 300K на (рис.2.7) було наведено результати, отримані експериментально[2, 31, 37,38]. Отримані, в ході розрахунків, функції рухливості, мають деяку розбіжність з експериментальними даними, проте з врахуванням того, що ми не враховували всі можливі чинники, результат можна вважати задовільним.

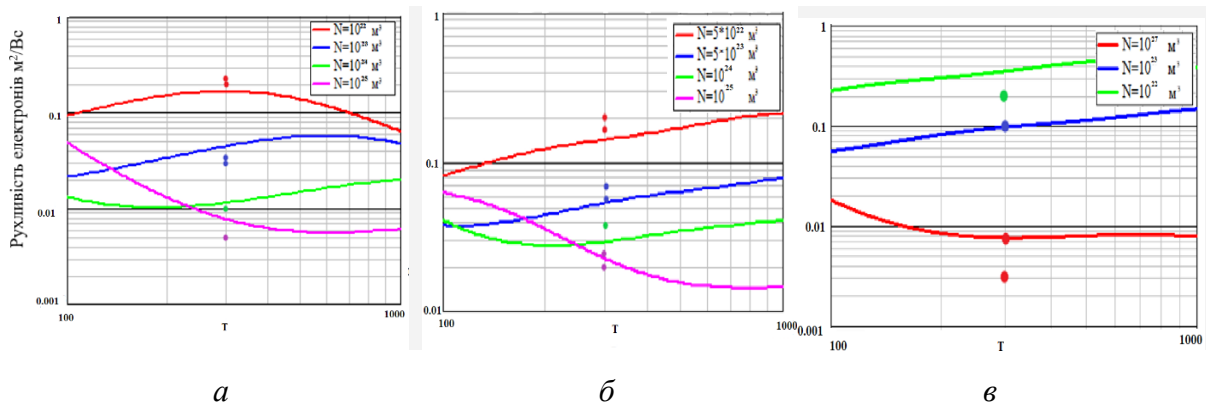


Рисунок . 2.7 – Верифікація результатів моделювання температурної залежності рухливості носіїв заряду GaN[31,37,38], InN[31,37,38] та AlN[3,31,37,38] для різної концентрації домішок

За представленими формулами для розрахунку рухливості побудовано графік температурної залежності рухливості носіїв заряду для бінарних сполук GaN, InN та AlN в широкому діапазоні концентрації домішок (рис. 2.8) .

Згідно з отриманими даними при 300K найбільшу рухливість демонструє InN. Отримані для GaN та AlN значення при 300K досить близькі.

Найбільша рухливість відповідає власним або ж слаболегованим матеріалам, згідно з отриманими результатами, для слаболегованих напівпровідників залежність рухливості електронів від температури має лінійну форму, така тенденція спостерігається при концентраціях до 10^{17} м^{-3} . Зі збільшенням концентрації залежність набуває параболічних ознак. В діапазоні концентрацій від 10^{17} до 10^{21} м^{-3} , рухливість електронів спочатку зростає до певного моменту, який відрізняється для кожної концентрації, с подальшим збільшенням температури рухливість починає спадати. При концентрації більше за 10^{21} за низьких температур відбувається «виморожування» домішки, що характеризується різким спадом рухливості, зі збільшенням температури, однак при температурах більше 100K рухливість знову починає зростати, при температурах більше 1000K рухливість демонструє однакову поведінку, незалежно від концентрації.

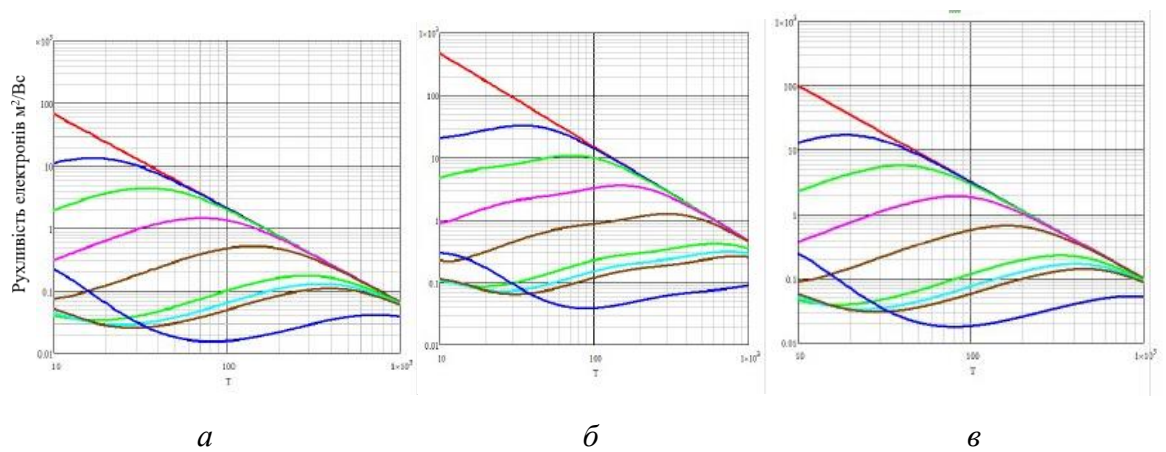


Рисунок . 2.8 – Змодельована залежність рухливості носіїв заряду в GaN(а), InN(б) та AlN(в) для широкого діапазону концентрації домішок

На основі наведених вище даних проаналізовано якість отриманих результатів та зміни що відбуваються з рухливістю електронів зі збільшенням концентрації домішки. Однак згідно з завданням, необхідно провести аналіз рухливості для потрійних сполук InGaN та InAlN. Для таких розрахунків обрана концентрація домішки 10^{23} м^{-3} .

На (рис. 2.9) зображено графіки залежності рухливості від температури, для чотирьох різних значень x .

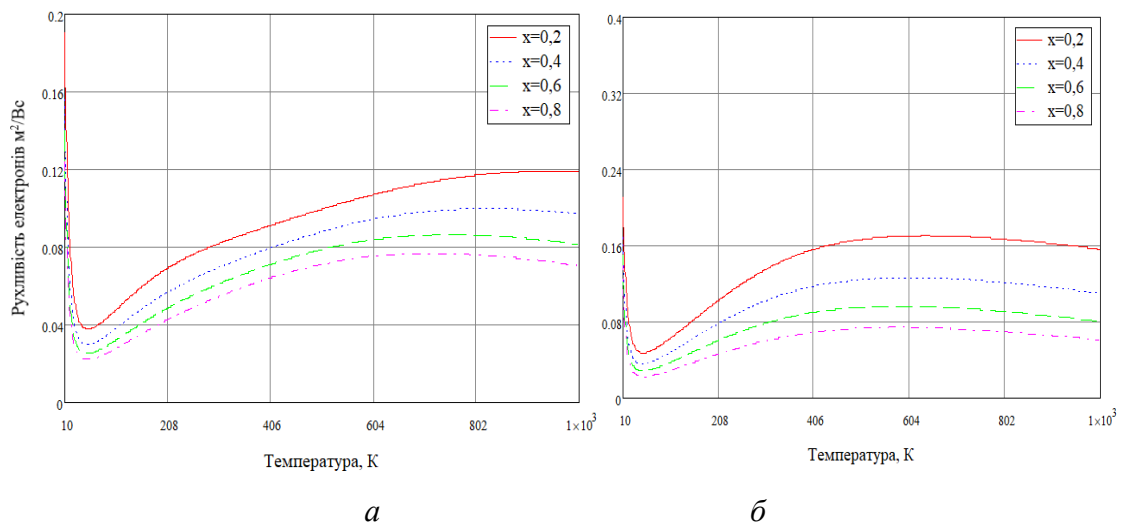


Рисунок .2.9 – Рухливість носіїв заряду від температури, для різних значень x . а– InGaN, б– InAlN. При концентрації 10^{23} м^{-3}

На графіках видно, що за кімнатної температури та концентрації домішок 10^{23}м^{-3} найбільшу рухливість показують матеріали з більшим вмістом індію. Однак вже при $x=0.6$, різниця між InGaN та InAlN незначна (0.6 та 0.56 відповідно). За однакового значення x більша рухливість притаманна InAlN.

2.3 Дрейфова швидкість

При дії на носії заряду зовнішнього електричного поля починається спрямований рух частинок, що також називають дрейфом носіїв заряду. В слабких електричних полях, швидкість дрейфового руху прямо пропорційна рухливості носіїв заряду та напруженості електричного поля.

2.3.1 При постійному електричному полі

Розглянемо випадок, коли електричне поле не змінюється в часі, тобто є постійним.

В слабких електричних полях, де електронна температура, приблизно дорівнює температурі ґратки, швидкість дрейфу зі змінною сили електричного поля змінюється лінійно (рис.2.11). В такому випадку залежність дрейфової швидкості від напруженості електричного поля описується формулою :

$$v = \mu \cdot E, \quad (7)$$

де μ – рухливість носіїв заряду, а E – напруженість електричного поля.

Коли мова заходить про сильні електричні поля ситуація ускладнюється, адже зі збільшенням сили електричного поля змінюється і електронна температура. Визначити, яким чином електронна температура залежить від

напруженості електричного поля досить складно, тому в даній роботі застосовували зворотну залежність, що представлена функцією [22]:

$$E(T_e) = \sqrt{\frac{3k(T-T_e)}{b_\Gamma \mu_\Gamma^2 m_{c\Gamma}(\gamma_\Gamma - 1) + b_L \mu_L^2 m_{cL}(\gamma_L - 1)}}, \quad (8)$$

де T_e – електронна температура;

b_Γ та b_L – відносна заселеність Γ – та L – долини відповідно;

γ_Γ та γ_L – коефіцієнт, що характеризує ефективність переходу енергії дрейфу в теплову для Γ – та L – долини відповідно.

Відповідно до [27] відносну заселеність долини можна визначити за формулою:

$$b_\Gamma = \frac{1}{1 + (m_{dL} m_{d\Gamma})^{3/2} \exp(\frac{-\Delta_{\Gamma L}}{kT})}, \quad (9)$$

де $\Delta_{\Gamma L}$ – відстань між Γ та L – долинами.

Відповідно до представленої формули (9) на (рис.2.10) відображена зміна заселеності долин при зміні напруженості електричного поля для потрійних сполук. Як відображено на графіках в слабкому режимі електричного поля всі електрони перебувають в нижній Γ –долині, однак зі збільшенням напруженості електричного поля, електрони набувають енергії, достатньої для переходу в більш високі долини, що відповідає L –долині. Відповідно до отриманих графіків для активізації міждолинних переходів в InGaN необхідно менше енергії, ніж InAlN. Зі збільшенням вмісту індію напруженість поля, при якому починається міждолинний перехід зменшується.

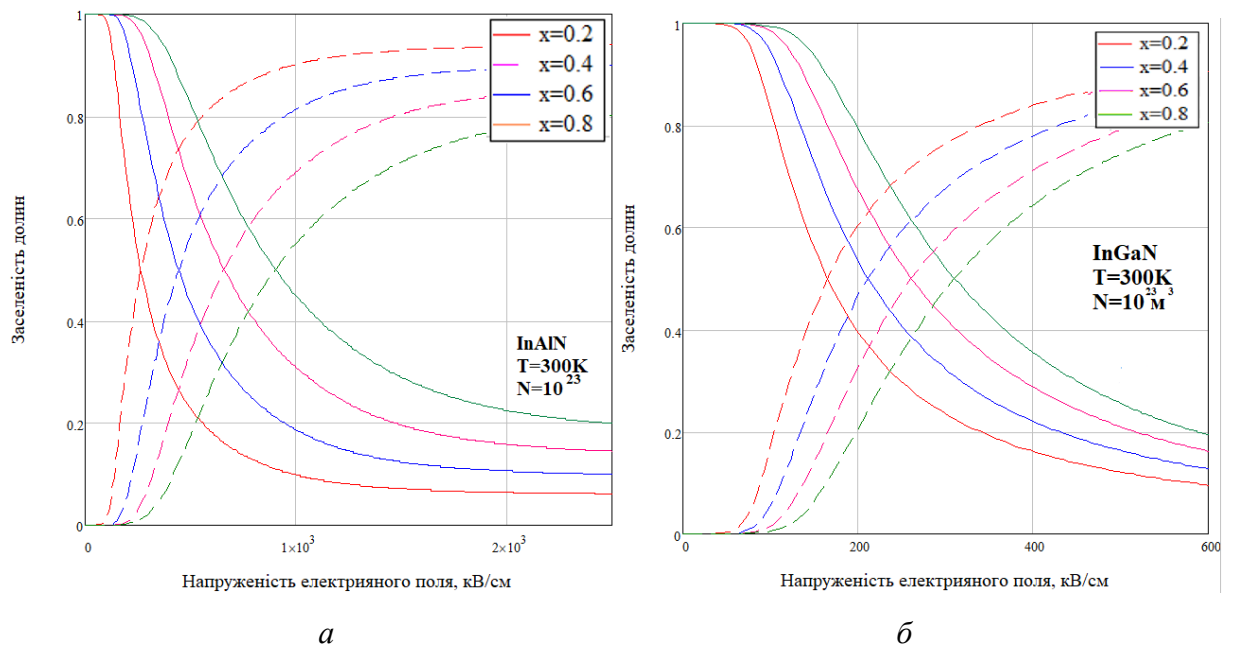


Рисунок .2.10 – Залежність заселеності долин від напруженості електричного поля. Для а – InAlN, б – InGaN

З використанням наведених формул (7–9) було побудовано графіки залежності дрейфової швидкості електронів від напруженості електричного поля для бінарних сполук (рис 2.11). До графіку залежності дрейфової швидкості від напруженості електричного поля для GaN було додано експериментальні дані наведені в [39] (2.11–б).

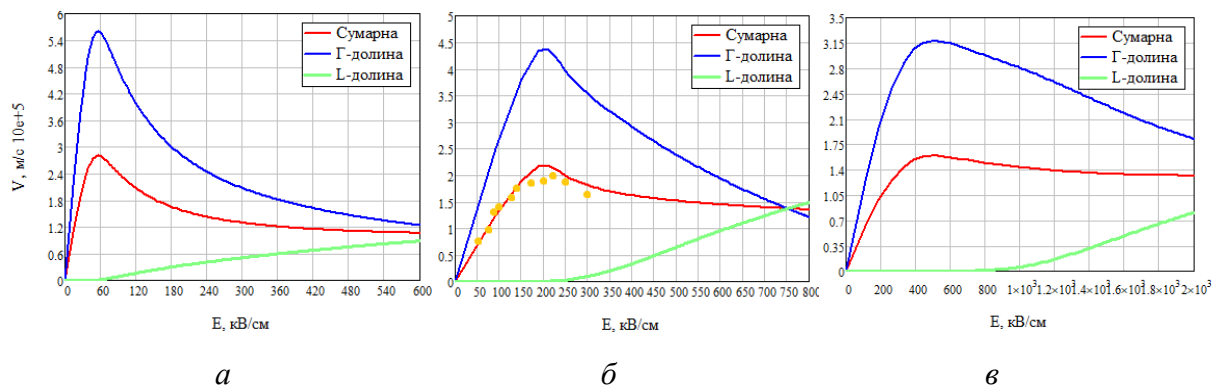


Рисунок .2.11 – Залежність дрейфової швидкості електронів від напруженості електричного поля. Для а – InN, б – GaN, в – AlN

На (рис.2.12) представлено залежність дрейфової швидкості від напруженості електричного поля розрахована для потрійних сполук. Як ми бачимо

на графіках (див. рис.2.11 та рис.2.12), найбільшому піку дрейфової швидкості відповідають матеріали з більшим вмістом індію. При збільшенні x в обох матеріалах спостерігається зсув піку дрейфової швидкості вправо, тобто для переходу в режим сильного поля необхідно більше енергії. Найменший пік дрейфової швидкості відповідає матеріалам з великим вмістом алюмінію. Зі зменшенням вмісту індію, перехід до режиму насичення відбувається за значно більшої напруженості електричного поля, що перш за все пов'язано зі збільшенням ефективної маси та міждолинної відстані.

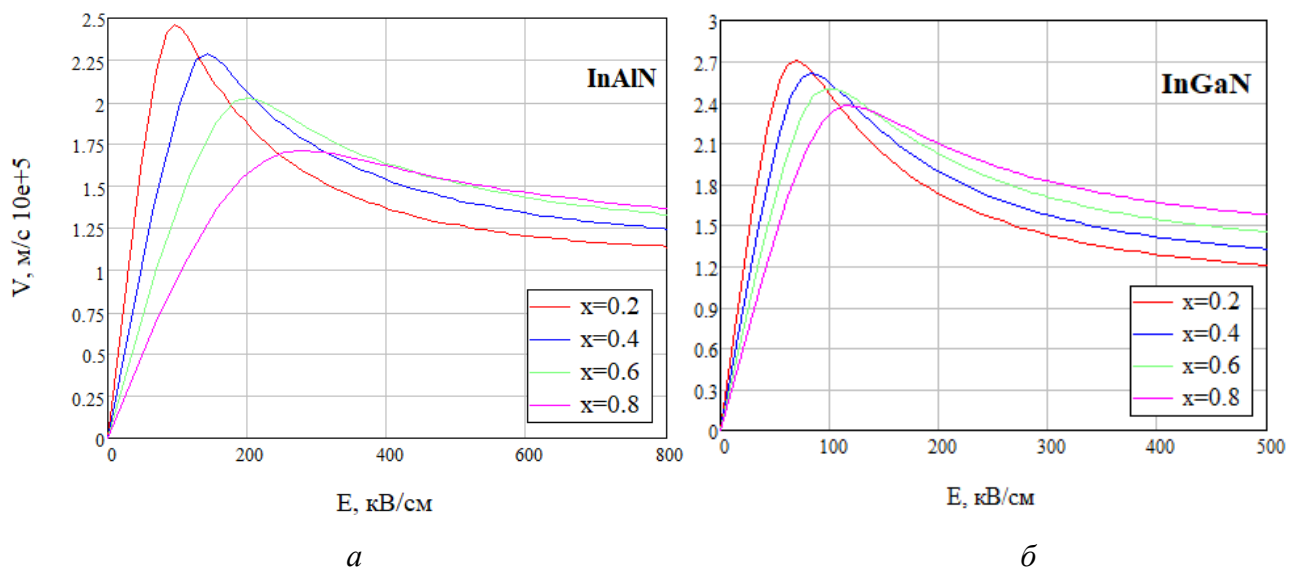


Рисунок .2.12 – Дрейфова швидкість InAlN(а) та InGaN(б) в залежності від напруженості електричного поля для різних значень x

2.3.2 Імпульсний режим електричного поля

Однією з особливостей дрейфової швидкості є її поведінка в імпульсному електричному полі, яка характеризується явищем «сплеску» дрейфової швидкості при різкому збільшенні електричного поля. Під «сплеском» розуміють різке збільшення дрейфової швидкості, що може бути в рази більшим за значення, отримане при постійному електричному полі. Для оцінки такого явища проведемо дослідження поле–швидкісної характеристики при амплітудах напруженості електричного поля, які відповідають:

1. Електричному полю за якої дрейфова швидкість змінюється лінійно
2. Критичному електричному полю, що відповідає піковому значенню дрейфової швидкості.
3. Електричному полю, що відповідає спаду дрейфової швидкості після пікового значення.
4. При амплітуді електричного поля, що відповідають усталеному стану дрейфової швидкості.

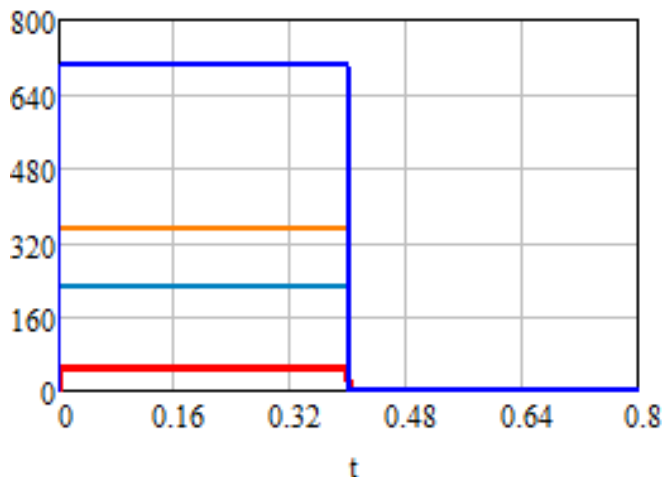


Рисунок . 2.13 – Амплітуда напруженості електричного поля для імпульсного режиму електричного поля.

Розрахунки дрейфової швидкості проведено за формулами, аналогічними до тих, що застосовувались при постійному електричному полі. На основі чого побудовано дрейфову швидкість в динамічному режимі електричного полі для бінарних сполук(рис.2.12). Як ми можемо побачити, зберігається тенденція, що була помітна при постійному полі, найбільший пік відповідає нітриду індію, а найменший нітриду алюмінію.

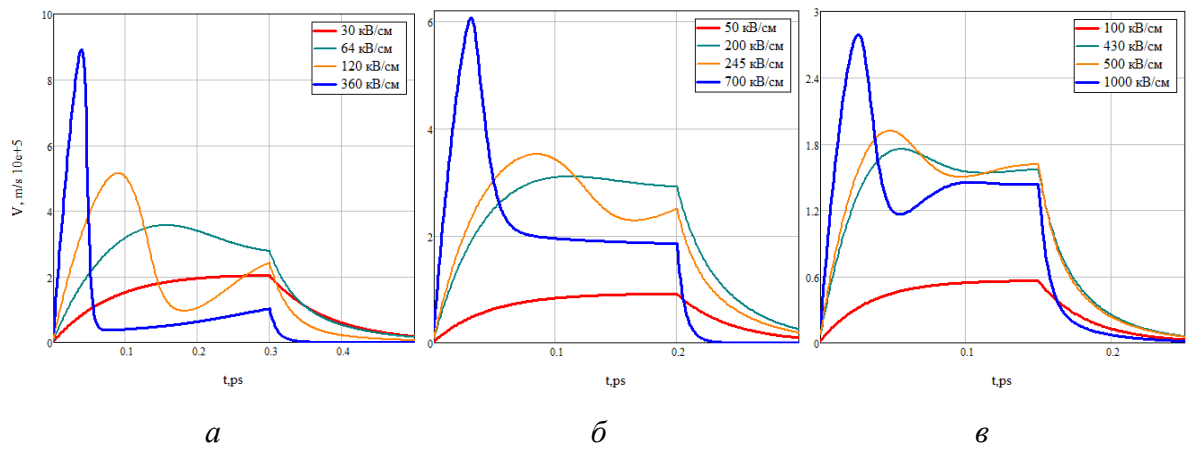


Рисунок .2.14 – Дрейфова швидкість при динамічному режимі роботи
для а – InN, б – GaN та в – AlN

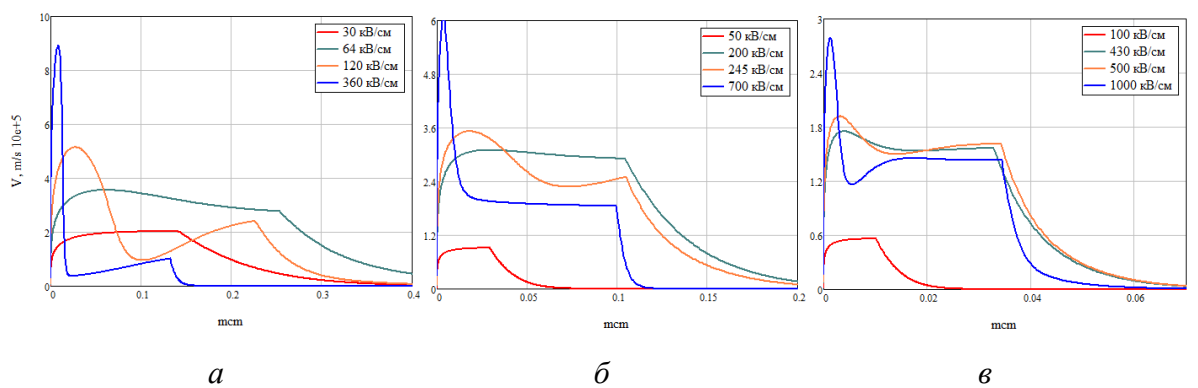


Рисунок . 2.15 – Залежність дрейфової швидкості від просторової
координати для а – InN, б – GaN та в – AlN

На (рис 2.16) та (рис 2.17) продемонстровано результати дослідження для InGaN та InAlN при двох значеннях x . Як можемо побачити, при збільшенні вмісту індію збільшується і величина «сплеску».

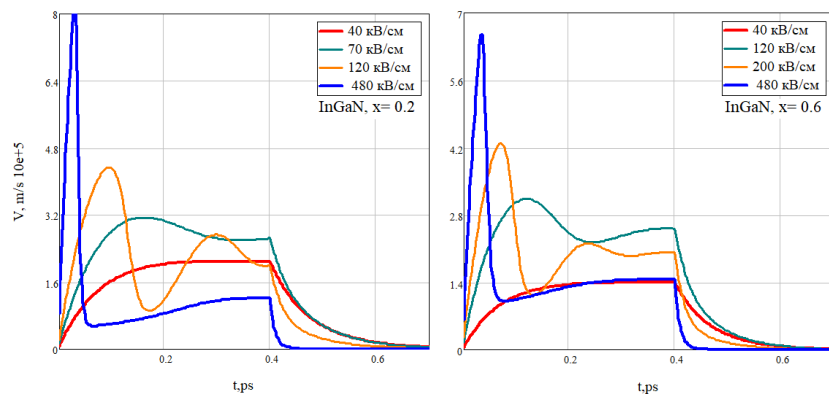


Рисунок . 2.16 – Залежність дрейфової швидкості в динамічному режимі
електричного поля в InGaN

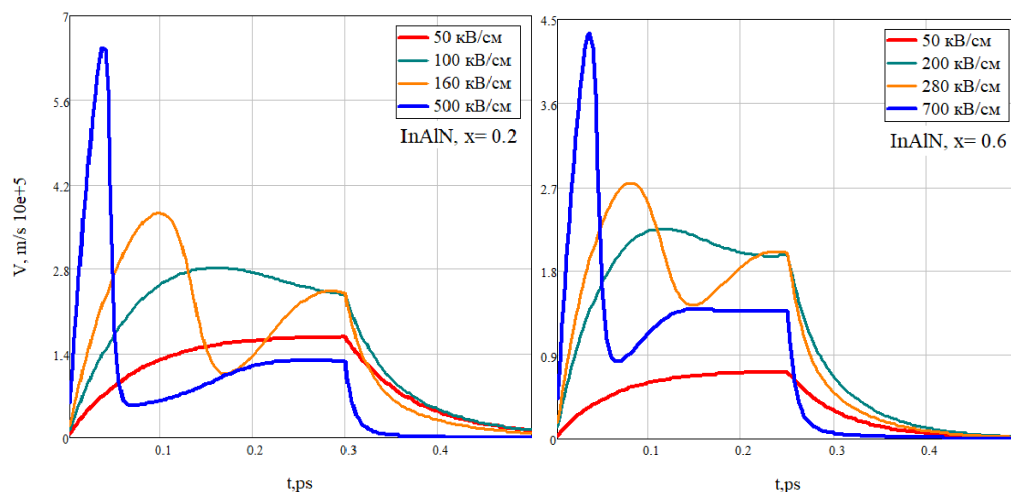


Рисунок . 2.17 – Залежність дрейфової швидкості в динамічному режимі електричного поля в InAlN

Явище «сплеску» пов'язане з інерційністю процесів розсіювання, та залежністю часів релаксації від напруженості електричного поля [22].

При амплітуді електричного поля, що відповідає електричному полю, за яким дрейфова швидкість змінюється лінійно, «сплеск» дрейфової швидкості відсутній, дрейфова швидкість швидко переходить до усталеного стану, однак при спаді електричного поля, дрейфова швидкість зменшується досить довго. При амплітуді електричного поля, що відповідає піку дрейфової швидкості, «сплеск» починає проявляти себе, чим більший перепад напруженості електричного поля, тим більша амплітуда «сплеску» та менша його тривалість.

Особливою ситуацією, можна вважати амплітуду, що відповідає переходу від піку дрейфової швидкості до усталеного стану в постійних полях. Для аналізу «сплеску» дрейфової швидкості було також побудовано графіки залежності від просторової координати (рис.2.18) та (рис.2.19).

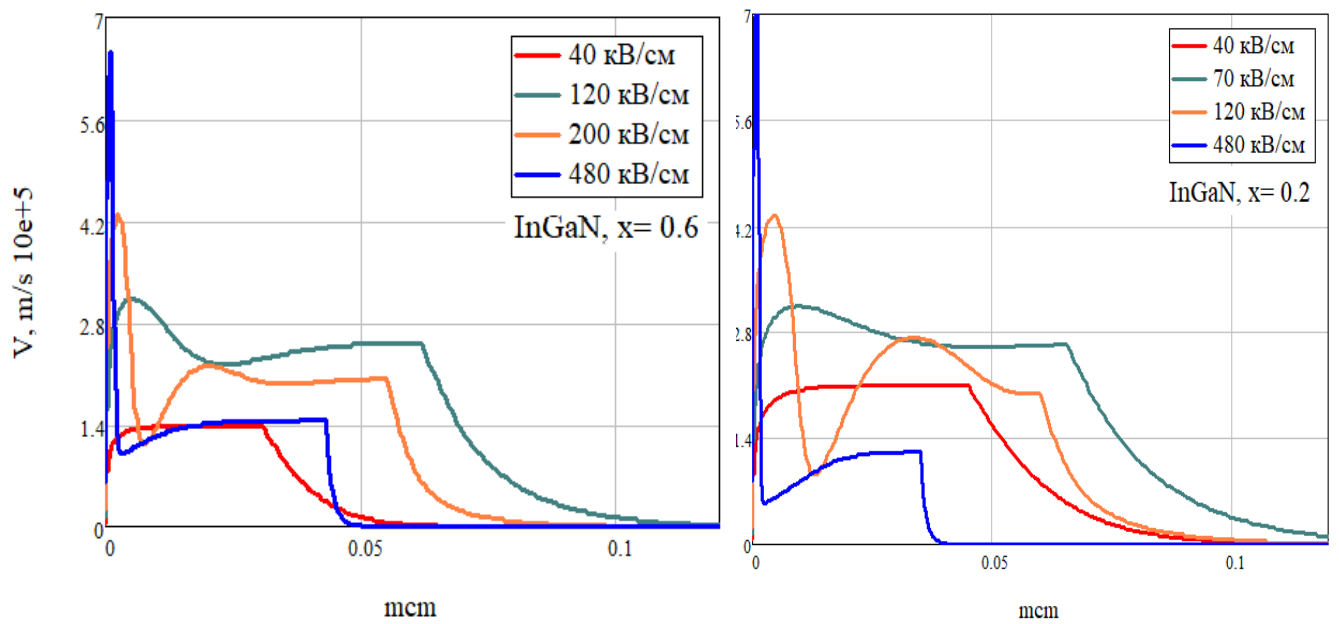


Рисунок . 2.18 – Залежність дрейфової швидкості від від просторової координати в InGaN

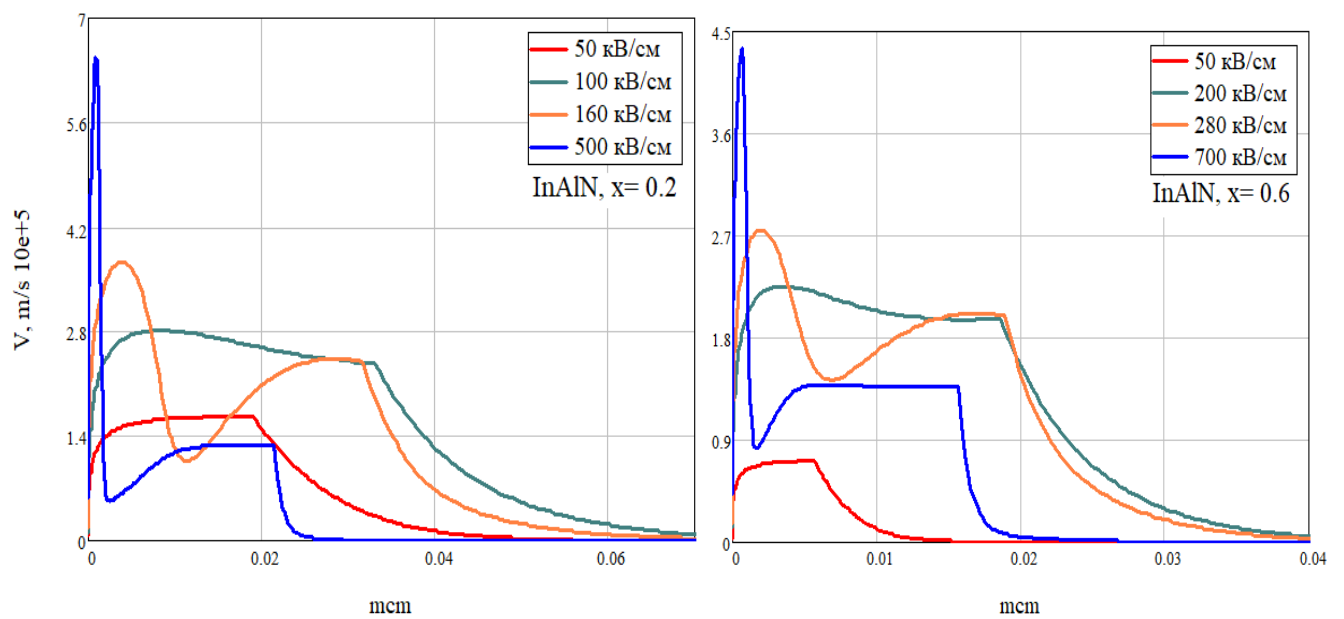


Рисунок . 2.19 – Залежність дрейфової швидкості від від просторової координати в InAlN

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

Відповідно до поставленої задачі в розділі проаналізовано процеси розсіювання в потрійних сполуках InAlN та InGaN. Згідно з отриманими результатами за низьких температур найбільший вплив має домішкове розсіювання, і вже при приблизно 400K, для всіх досліджуваних матеріалів акустичне розсіювання стає домінуючим.

Аналіз рухливості електронів представлено в п.2.2. Для підтвердження отриманих даних було проведено верифікацію з знайденими експериментальними даними[2,32,34,35]. Згідно з верифікацією отриманий результат можна вважати задовільним. Було представлено графіки рухливості для бінарних сполук в широкому діапазоні концентрацій домішок. Рухливість в слабких полях, для потрійних сполук InAlN та InGaN розраховано за концентрацією домішок 10^{23} м^{-3} . За кімнатної температури найбільшу рухливість показують матеріали з більшим вмістом індію. Однак вже при $x=0.6$, різниця між InGaN та InAlN незначна, що вказує на сильний вплив індію в сполуці, при зменшенні його вмісту потрійні сполуки InGaN та InAlN майже не розрізняються за рухливістю.

Відповідно до завдання дисертації, було розраховано дрейфову швидкість при постійному електричному полі та при імпульсному режимі електричного поля. Згідно з виконаними розрахунками в потрійних сполуках з більшим вмістом індію, дрейфова швидкість набуває максимального значення за меншої напруженості поля. Найбільша енергія для активізації міждолиних переходів, необхідна матеріалам з більшим вмістом алюмінію, при $x=0.8$, пік дрейфової швидкості досягається при $\approx 430 \text{ кВ/см}$.

Для імпульсного режиму електричного поля проаналізовано чотири характерні значення амплітуд, що відповідають: які відповідають:

1. Електричному полю за якої дрейфова швидкість змінюється лінійно
2. Критичному електричному полю, що відповідає піковому значенню дрейфової швидкості.

3. Електричному полю, що відповідає спаду дрейфової швидкості після пікового значення.

4. При амплітуді електричного поля, що відповідає усталеному стану дрейфової швидкості.

3. СТАРТАП ПРОЕКТ

3.1 Опис ідеї проекту

Розробимо стартап–проект для дослідження динамічних властивостей потрійних сполук InGaN та InAlN

В ідею стартап–проекту покладено дослідження динамічних властивостей потрійних сполук, задля спрощення моделювання електричних характеристик приладів на їх основі. Коло застосування данної ідеї , описано у (див. табл. 3.1)

Таблиця 3.1 – Опис ідеї стартап–проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Дослідження динамічних властивостей потрійних сполук.	1. Виробництві оптоелектронних та надпотужних приладах. 1.	Спрощення теоретичних розрахунків та моделювання електричних характеристик приладів, на основі потрійних сполук.
	2. Науковому напрямку	Подальше дослідження потрійних сполук на основі вже виконаних досліджень.

Отже, ідея проекту має досить широке кола застосування, як в науковому напрямі, так і серед приватних підприємств.

Таблиця 3.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї стартапу.

№ п/п	Техніко– економічні характерист ики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W(слабка)	N (нейтральна	S(сильна)
		Мій продукт	API			
	Економічні	Низька ціна, відсутність витрат на утилізацію та логістику	Запропонований продукт, має вищу вартість та потребує додаткових витрат на логістику.			+
	Якість	Дослідження дуже гарно стикуються з відомими експериментальними даними	Запропоновано дослідження різних авторів.		+	
	Технологіч ність	Для покращення якості необхідні додаткові витрати на обладнання	Якість товару не залежить від обладнання	+		

Було проведено аналіз сильних та слабких сторін проекту, згідно з яким, описана ідея має як певні переваги, так і недоліки, яких можна позбутися з розвитком компанії.

3.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Існує досить багато методів реалізації цього проекту, серед яких було обрано три найдоступніші, що представлені у (див. табл. 3.3). Згідно з представленими даними технологічного аудиту проект є технічно реалізованим, для реалізації ідеї було обрано програмне забезпечення Matcad.

Таблиця 3.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Дослідження динамічних	Програмне забезпечення Matlab	Наявна	Доступна
2	властивостей потрійних сполук.	Програмне забезпечення Matcad	Наявна	Доступна
3		Програмне забезпечення Anaconda	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Робочий простір Matcad				

3.3 Аналіз ринкових можливостей стартап–проекту

Для аналізу ринкових можливостей використовувались такі показники як загальний обсяг продаж, кількість головних гравців на ринку, динаміку ринку, наявність обмежень для входу. Як це представлено в (див. табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап–проекту

№ п/п	Показники стану ринку досліджень матеріалів	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	1
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	На етапі впровадження невідомий
3.	Динаміка ринку(якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	15%

Ринок насичений як потенційними клієнтами, так і конкурентними фірмами, динаміка ринку позитивна, що говорить про зростання кількості клієнтів та конкурентів. Проект має середню рентабельність, та немає обмежень для виходу на ринок.

Таблиця 3.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап–проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних цільових груп	Вимоги споживачів до товару
	Можливість дослідження електричних характеристик матеріалів, що застосовуються.	Дослідницькі інститути, лабораторії. Підприємств а.	Відсутні	Достовірність всіх даних про властивості матеріалу, ціна.

Було проведено аналіз потенційних клієнтів сатрап–проекту (див. табл. 3.5) згідно якого визначено, що головною вимогою клієнтів до проекту буде достовірність результатів дослідження та низька ціна на отримані результати.

Для розуміння факторів, що несуть загрозу або можливості для проекту було проведено аналіз ринкового середовища (див. табл. 3.6 та табл. 3.7)

Таблиця 3.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Низький попит на продукт	Низький попит на продукт на початку впровадження проекту через відсутність інформації щодо нього	Рекламне просування товару серед потенційних клієнтів
2.	Потреба в ресурсах	Необхідність технічного обладнання для підтвердження результатів теоретичних розрахунків та підвищення достовірності отриманих даних.	Укладання договорів з поставниками ресурсів та оренда приміщення для створення дослідницьких центрів.

Таблиця 3.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Малий обсяг конкурентів на ринку товару.	Зменшення вартості товару, покращення якості.

Продовження таблиці 3.7

2.	Попит	Високий попит на достовірні дані.	Збільшення обсягу клієнтів.
3.	Залучення нових технологій	Укладання договорів з підприємствами	Використання нових технологій для покращення якості продукції
4.	Створення нових технологій.	Покращення якості продукції.	Іновації в компанії.

Згідно з проведеним аналізом ринкового середовища, хоча проект має низку загроз, реалізація наявних можливостей та правильний підхід компанії, може зменшити ризики до мінімуму.

Розглянемо детальніше загрозу від конкурентів в галузі, для цього проведемо ступеневий аналіз конкуренції на ринку та аналіз конкуренції за М.Портером (див табл. 3.8 та 3.9)

Таблиця 3.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції – чиста конкуренція	Велика кількість конкурентів	Збільшення кількості корисних функцій товару порівняно з конкурентом, якості товару та зменшення вартості
2. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний	Більшість конкурентів розміщуються за межами України.	Розширення філіалів підприємства.

Продовження до таблиці 3.8

3. За галузевою ознакою – міжгалузева	Цільовою аудиторією є компанії різних галузей.	Індивідуальний підхід до клієнтів, підвищення якості
4. Конкуренція за видами товарів: – товарно–видова	Конкуренція між товарами одного виду	Необхідно вдосконалити якість дослідження.
5. За характером конкурентних переваг – нецінова	Надходження на ринок великої кількості продукції за доступною ціною	Реклама на конференціях та семінарах, задля привернення уваги клієнтів до продукції компанії.
6. За інтенсивністю – не марочна	Роль торгової марки на ринку є незначною.	Створення бази постійних клієнтів.

Згідно з проведеним аналізом, для виходу на ринок обмежень немає, тож конкурентна боротьба досить інтенсивна, можлива поява нових конкурентів. Постачальники присутні на ринку в достатній кількості, однак при стрімкому росту компанії, виникає необхідність укладання постійних договорів, для підтримки якості продукції. Щоб закріпитись на ринку компанії необхіден індивідуальний підхід, та дотримання норм якості, адже клієнти диктують саме такі умови ринку.

Оскільки конкурентна боротьба носить немарочний характер, можна не витрачати кошту на бренд, та популізацію продукції, замість цього підвищити якість, та зменшити ціни.

Для подальшої роботи на ринку необхідно створювати більше філіалів в інших країніх, оскільки основний ринок клієнтів і постачальників знаходиться за межами держави.

Табл.3.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товаризамінники
	АРІ	Відсутні бар'єри для входу на ринок	Кількість постачальників незначна, проте їх достатньо щоб задовільнити потреби ринку	До факторів сили споживачів відносять: розмір закупівель; рівень чутливості до цін, прибутки, контроль якості	Відсутні
Висновки:	Конкурента боротьба досить інтенсивна, в загальному випадку її можна розглядати як не марочну, основна увага приділяється якості продукту.	На ринку відсутні бар'єри для входу, тож потенційні конкуренти присутні	Постачальники диктують роботу ринку, оскільки якість товару залежить від наявності обладнання.	Клієнти диктують умови ринку, що стосуються якості вихідного продукту та чутливості до цін.	Обмеження ринку через товарозмаїники відсутне.

Згідно з проведеним аналізом конкуренції на ринку, було складено перелік факторів конкурентоспроможності, що диктуються умовами ринку (див. табл. 3.10)

Таблиця 3.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1.	Ціна товару	Отримання максимального прибутку, можливість входження до певного сегменту ринку, доступність товару для споживача
2.	Якість товару	Гарантія щодо якості проведених досліджень
3.	Наявність обладнання	Якісне обладнання дозволяє отримати експериментальне підтвердження отриманих розрахунків
4.	Інформаційне забезпечення	Можливість співпраці з конкурентами, та залучення нових клієнтів
5.	Інноваційний характер досліджень	Нові засоби та методи досліджень для отримання максимально якісного продукту
6.	Індивідуальний підхід	Клієнто–орієнтований підхід до обслуговування, створення бази постійних клієнтів

За перерахованими факторами, було здійснено порівняльний аналіз компанії з існуючими конкурентами, на прикладі компанії–конкурента API (див табл. 3. 11). Згідно з проведеним аналізом, до слабких сторін проекту можна віднести нестачу обладнання для досліджень, та інформаційного забезпечення клієнтів. Стан обох факторів, можна покращити, з розвитком компанії.

До сильних сторін проекту можна віднести якість, та ціну. Інші фактори носять нейтральних характер.

Можливості і загрози, що несуть ці фактори було наведено при проведенні SWOT– аналізу (див табл. 3. 12).

Таблиця 3.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1–20	Рейтинг товарів–конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			–3	–2	–1	0	+1	+2	+3
1.	Ціна товару	16					+		
2.	Якість товару	18						+	
3.	Наявність обладнання	7	+						
4.	Інформаційне забезпечення	8		+					
5.	Інноваційний характер досліджень	12				+			
6.	Індивідуальний підхід	18						+	

Таблиця 3.12 – SWOT– аналіз стартап–проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
<ul style="list-style-type: none"> – Якісна продукція – Заключення договорів з підприємствами – Доступна цінова політика – Індивідуальний підхід до кожного клієнта 	<ul style="list-style-type: none"> – Велика кількість конкурентів на ринку послуг. – Недостатність обладнання для подальшого покращення якості товарів – Недостатність інформованості про товар
Можливості:	Загрози:
<ul style="list-style-type: none"> Створення нових технологій. Покращення продукту інноваційними методами. 	<ul style="list-style-type: none"> Витіснення конкурентами. Нестача коштів на необхідне обладнання.

На основі проведеного SWOT– аналізу було виділено альтернативи для ринкового впровадження проекту (див табл. 3. 13), з яких було обрано третю, а саме пошук нових технологій та інноваційних методів для дослідження. Ця

альтернатива, не потребує багато ресурсів, та може бути реалізована в найкоротший термін. Вона дозволить підвищити якість продукції, та зробити її привабливішою для клієнтів.

Таблиця 3.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап–проекту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Проведення конференцій, семінарів, для ознайомлення з продукцією компанії	40%	2 роки
2.	Залучення спонсорів для отримання інвестицій на розвиток проекту.	12%	6 місяців
3.	Пошук нових технологій та інноваційних методі для покращення якості продукту.	60%	6 місяців

3.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Першочерговою задачею, при розробці стратегії проекту є визначення цільової групи потенційних клієнтів. Повний аналіз цільових груп було продемонстровано в (див табл. 3. 14). Було прийнято рішення охопити весь сегмент ринку, та використовувати стратегію диференційованого маркетингу, пропонуючи різний підхід для різних цільових груп.

Відповідно до обраного сегменту ринку, було запропоновано низку базових стратегій (див табл. 3. 15).

Таблиця 3.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Дослідницькі установи: лабораторії, інститути.	Готові	Високий	Висока	Проста
2.	Приватні підприємства	Готові	Середній	Низька	Складна
3.	Приватні особи	Не готові	Низький	Низька	Складна
Які цільові групи обрано: Дослідницькі установи та Приватні підприємства					

Таблиця 3.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Пошук нових технологій для покращення якості продукту.	Створення особливостей, що відрізняють товар від товару конкурентів.	Якість кінцевого продукту, доступна ціна, технологічність.	Стратегія Диференціації

Таблиця 3.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Так	Ні	Заняття конкурентної ніші

Таблиця 3.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту.
1.	Якість, доступна ціна.	Стратегія Диференціації	Якість, ціна, індивідуальний підхід до клієнтів	Якість, доступність, довготривала співпраця

Відповідно до проведеного аналізу конкурентного середовища, була обрана базова стратегія поведінки, а саме заняття конкурентної ніші (див табл. 3. 16). Компанія буде створювати бар'єри для входу на ринок для запобігання появи конкурентів. Програми лояльності та індивідуальний підхід до клієнтів будуть націлені на накопичення клієнтської бази, та розширені можливостей компанії задля подальшого розвитку. Було вирішено, що компанія буде позиціонувати себе, як компанія з продукцією найкращої якості за приємною ціною, та індивідуальним підходом до кожного (див табл. 3. 17).

3.5 Розроблення маркетингової програми стартап–проекту

Для створення конкурентоспроможної маркетингової програми, було визначено ключові переваги товару, що представлено у (див табл. 3. 18).

Таблиця 3.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1.	Точні дослідження матеріалів.	Якісне дослідження, що підтверджуються експериментальними даними	Точні, якісні дослідження. Низька ціна.

Таблиця 3.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Точні дослідження кінетичних властивостей матеріалів.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1.Якість	Нм	Тх
	2.Ціна	Нм	Вр
	3. Мінімізація часу в який послуга буде отримана	Нм	Тл
	Якість: дані отримують експериментальне підтвердження		
	Пакування не потребує		
III. Товар із підкріпленням	Марка: назва організації		
	До продажу: гарантії компанії		
	Після продажу: Заміна товару, за гарнтією.		
Товар буде захищено правом на інтелектуальну власність.			

В (див. табл. 3.19) описана трирівнева маркетингова модель товару, згідно з якої товар буде захищатися правом на інтелектуальну власність.

Задля встановлення конкурентної ціни в (див. табл. 3.20) було проведено аналіз цінового діапазону, в якому продаються товари аналоги, та рівень цільової аудиторії. Аналіз було проведено методом експертної оцінки.

Таблиця 3.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари–замінники	Рівень цін на товари–аналоги	Рівень цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	—	200–1000\$	200 000\$	150–700\$

Оскільки товар буде розповсюджуватись через веб–сайт компанії, найоптимальнішим є нульовий рівень каналів збуту, тобто система збуту буде керуватись силами компанії, без застосування посередників.

Таблиця 3.21 – Формування систем збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Замовлення на веб–сайті компанії	Встановлення контакту, інформація щодо товару, підтримка. Надсилання готового продукту.	Канал нульового рівня. Посередники відсутні	Компанія реалізує продукцію самостійно.

Результатом розроблення маркетингової стратегії компанії стала готова концепція товару, що позиціонує себе за такими основними критеріями як ціна та

якість. Обрання оптимальної моделі збуту та створення концепції рекламного повідомлення (див. табл. 3.22)

Таблиця 3.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Відсутня	Інтернет, телефоні комунікації, електронна пошта.	Якість, доступність, довготривала співпраця	Поширення інформації про дослідження серед потенційних клієнтів	Підкреслення переваг продукту, представлення вигоди в порівнянні з конкурентами

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

Для створеного стартап проекту існує можливість комерціалізації, серед проаналізованої цільової аудиторії досить високий попит. Динаміка ринку в цілому позитивна, бар'єри для входження на ринок відсутні. Згідно з проведеним аналізом, даний стартап проект має рентабельність 15%.

За оцінкою конкуренції на ринку, на сьогодні ринку притаманна чиста конкуренція, тобто чисельність конкурентів досить значна. Однак продукт компанії, є конкурентоспроможним. Конкурентна боротьба на ринку носить неціновий та немарочний характер.

Для впровадження на ринку було обрано пошук нових технологій та інновацій, задля підвищення якості готової продукції та зменшені витрат при виробництві.

Подальший розвиток проекту можна вважати доцільним, оскільки низка переваг проекту та запропоновані ринкові та маркетингові стратегії розвитку, підвищують шанси успішного впровадження на ринок.

ВИСНОВКИ

Згідно з поставленими завданнями в першому розділі проведено аналіз параметрів сполук на основі нітридів. В першу чергу проаналізовано кристалічні структури, що характерні для матеріалів, на основі чого прийнято рішення надалі досліджувати потрійні сполуки InAlN та InGaN з кристалічною модифікацією вюрциту.

В першому розділі також представлено аналіз таких параметрів, як: заборонена зона; ефективна маса; енергія фононів; діелектрична проникність; швидкість звуку та акустичний деформаційний потенціал. Під аналізом, розуміємо пошук джерел, з інформацією про дані параметри в бінарних та потрійних сполуках, та побудову схеми, за якою відбувається зміна параметрів при зміні вмісту потрійної сполуки, тобто значення x .

Найбільш повно параметри матеріалів представлені в джерелах [1–4, 13–15, 23, 31, 39]. Обрані для подальшого дослідження параметри бінарних сполук занесено в Додаток А. Більшість параметрів наведених у таблиці близькі до значень, знайдених експериментально [10, 34, 39].

В другому розділі проаналізовано процеси розсіювання в потрійних сполуках InAlN та InGaN. В розділі представлено графіки рухливості для бінарних сполук в широкому діапазоні концентрацій домішок та графіки рухливості потрійних сполук InAlN та InGaN, що було розраховано за концентрацією домішок 10^{23} м^{-3} . За кімнатної температури найбільшу рухливість показують матеріали з більшим вмістом індію.

Розраховано дрейфову швидкість при постійному електричному полі та при імпульсному режимі електричного поля. Згідно з виконаними розрахунками, в потрійних сполуках з більшим вмістом індію, дрейфова швидкість набуває максимального значення за меншої напруженості поля. Найбільше енергії для активізації міждолиних переходів, необхідно матеріалам з більшим вмістом

алюмінію, при $x = 0,8$, максимальне значення досягається при ≈ 430 кВ/см. Це пояснюється більшою ефективною масою в нітриді алюмінію та більшою міждолиною відстанню

Для імпульсного режиму роботи електричного поля було проаналізовано чотири характерні значення амплітуд, що відповідають:

1. Електричному полю за якої дрейфова швидкість змінюється лінійно
2. Критичному електричному полю, що відповідає піковому значенню дрейфової швидкості.
3. Електричному полю, що відповідає спаду дрейфової швидкості після пікового значення.
4. При амплітуді електричного поля, що відповідають усталеному стану дрейфової швидкості.

На основі виконаної роботи, створено стартап проект, та проаналізовано можливість реалізації проекту на ринку.

Оскільки серед проаналізованої цільової аудиторії досить високий попит, динаміка ринку в цілому позитивна, а бар'єри для входження на ринок відсутні, ми можемо вважати комерціалізацію проекту можливою. Продукт компанію оцінено як конкурентоспроможний. Для впровадження на ринку було обрано пошук нових технологій та інновацій, задля підвищення якості готової продукції та зменшені витрат при виробництві.

Подальший розвиток проекту можна вважати доцільним, оскільки низка переваг проекту та запропоновані ринкові та маркетингові стратегії розвитку, підвищують шанси успішного впровадження на ринок.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

2. Пасынков В. В., Сорокин В. С. «Материалы электронной техники.» (СПб.: Лань, 2001).
3. М. Левинштейна, С. Румянцева и М. Шура «Серия справочников по параметрам полупроводников». т. 1,2, World Scientific, Лондон, 1996, 1999. Электронный ресурс. Режим доступа до ресурсу: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>
4. «Новые Полупроводниковые материалы. Характеристики и свойства». Электронный ресурс. Режим доступа до ресурсу: http://www.matprop.ru/GaN_optic
5. Shur M. S., Devis R. F. «GaN–based materials and devices. Selected topics in electronics and systems. Vol. 33.» Singapore/New Jersey/London/Hong Kong: World Scientific, 2004)
6. Bousahla Z., Abbar B., Bouhafs B., Tadjer A. Phys. Stat. Sol. (b) 241. 4. P. 876. (2004)
7. O’Leary S. K., Foutz B. E., Shur M. S., Bhapkar U. V., Eastman L.F. «Electron transport in wurtzite indium nitride» J. Appl. Phys. 83, N 2. 826. (1998). Режим доступа до ресурсу: <https://doi.org/10.1063/1.366641>
8. Тарасов С.А. «Полупроводниковые оптоэлектронные приборы.» (СПб.: Изд–во СПбГЭТУ, 2008).
9. Давыдов С.Ю., Клочихин А.А. ФТП. 38, N8. С.897. (2004).
10. Joachim Piprek. «Nitride Semiconductor Devices Principles and Simulation » ISBN: 978–3–527–40667–8
11. К.К. Боль, В.А. Москалюк «Вакуумная, плазменная и квантовая электроника» ElectronComm 2014, Vol. 19, №5(82) “ УДК 621.383 ISSN 1811–4512.
12. Хегази Х. Х., Тарасов С. А. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 1, С. 9. (2004).
13. Tianbiao Zhang, Jerry Tian «Soft Magnetic Materials» Volume 298 of Advanced Materials Research ISSN 1022–6680

14. Simon Aldridge, Anthony J. Downs «The Group 13 Metals Aluminium, Gallium, Indium and Thallium: Chemical Patterns and Peculiarities.» © 2011 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-68191-6
15. Farid Medjdoub, Krzysztof Iniewski «Gallium Nitride (GaN) Physics, Devices, and Technology» ISBN 13: 978-1-4822-2004-9
16. N. A. Masyukov and , and A. V. Dmitriev. «High field electron transport in indium gallium nitride and indium aluminium nitride»
17. М. Лопес, Ф. Саккони, М. Ауф дер Маур, А. Печчия, А. Ди Карло. «Атомистическое моделирование светодиодов на квантовых дисках InGaN / GaN» (2012). Оптическая и квантовая электроника . 44 (3): 89–94. doi : 10.1007 / s11082-012-9554-3
18. JunShuai Xue, JinCheng Zhang, YaoWei Hou et al.// Appl. Phys. Lett 2012 100.P. 013507
19. Haoran Chen, Lin'an Yang, Yue Hao // J. Appl. Phys. 2014. 116. P. 074510
20. Lugani L., Py M.A., Carlin J.-F., Grandjean N. // J. Appl. Phys. 2014. 115 P.074506
21. T.D. Veal, C.F. McConville, W.J. Schaff «Indium Nitride and Related Alloys» ISBN 13: 978-1-4200-7810-7 (Ebook)
22. Москалюк В.А., Тимофеев В. И., Федяй А.В. «Сверхбыстродействующие Приборы электроники. Учебное пособие». НТУУ «КПИ». 2012. 479 с. УДК 621.38 : 53 (075.8)
23. Тарасов С. А., Пихтин А. Н. «Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Учеб. пособие». Т 19 СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 96 с.
24. S. Saiba , N. Bouarissab, Journal of Physics and Chemistry of Solids «Electronic properties and elastic constants of wurtzite, zinc-blende and rocksalt AlN» 67 (2006) 1888–1892
25. Ponce F.A., Dupuis R.D., Nakamura S. and Edmond J.A., «A comparison of the electronic and optical properties of zinc-blende, rocksalt and wurtzite AlN: A DFT study»
26. Robert F. Davis, T. W. Weeks, Jr., M. D. Bremser, S. Tanaka, R. S. Kern, Z. Sitar, K. S. Ailey, W. G. Perry And C. Wang «Issues And Examples Regarding Growth

Of AlN, GaN And Al_xGa_{1-x}N Thin Films Via OMVPE And Gas Source MBE.» North Carolina State University, Department Of Materials Science And Engineering, Raleigh, NC 27695–7907

27. Satta, Vincenzo Fiorentini, Andrea Bosin, And F. Meloni INFN–Dipartimento Di Scienze Fisiche, Università Di Cagliari, «Structural And Electronic Properties Of AlN, GaN And InN, And Band Offsets At AlN/GaN (1010) And (0001) Interfaces» 1–09124 Cagliari, Italy
28. Klaus Wandelt «Surface and Interface Science»
29. С. А. Сергеев, А. И. Михайлов, Б. В. Сергеева «Перспективы применения нитридов галлия, индия и алюминия для функциональных устройств на волнах пространственного заряда»
30. Takafumi Y., Soon–Ku H. «Oxide and Nitride Semiconductors. Processing, Properties, and Applications.» (Berlin: Springer, 2009).
31. Sadao Adachi «Properties of semiconductor alloys : group–IV, III–V and II–VI semiconductors /. p. cm. Includes bibliographical references and index. ISBN 978–0–470–74369–0
32. Давыдов В.Ю., Ключкин А.А. «Электронные и колебательные состояния InN и твердых растворов InGaN»
33. В. В. Муравьев, А.А. Тамело, В.Н. Мищенко «Исследование Особенности Переноса Электронов В Полупроводниковых Приборах На Основе GaN» Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь УДК 612.382
34. Takahashi K., Yoshikawa A., Sandhu A «Wide Bandgap Semiconductors. Fundamental Properties and Modern. Photonic and Electronic Devices.» (Berlin: Springer, 2007).
35. Moskaliuk V. «Physics of Electron Processes. Dynamic Processes : Textbook, Kyiv: Politehnika», ,2004, p. 180.
36. V.A. Moskaliuk, Y.S. Sinekop and R. Kassing, «Physics of electron processes. Electronic states, Kiev: UkrINTEI», 2001, 148 p. (In Russian)

37. Wongchotikul, K., Chen N., Zhang D.P., Tang X., Spencer M.G., in Gallium Nitride and Related Materials. Eds. Ponce F.A., Dupuis R.D., Nakamura S. and Edmond J.A., «Material Research Society Symposium Proceedings», 395 (1996), 279–282. H12
38. Chin, V.W.L., Tansley, T.L., Osotchan, T., «Electron mobilities in gallium, indium, and aluminum nitrides.» J. Appl. Phys. 75, 11 (1994), 7365–7372
39. В. В. Муравьев, А.А. Тамело, В.Н. Мищенко «Исследование Особенности Переноса Электронов В Полупроводниковых Приборах На Основе GaN»
40. Wraback, M. , Shen, H. , Carrano, JC , Li, T. , Campbell, JC , Schurman, MJ , Ferguson, IT « Time-resolved electroabsorption measurement of the electron velocity-field characteristic in GaN»

ДОДАТОК А

		InN	AlN	GaN
Ширина зз	эВ	0.69 ^а	6.2 ^{аб}	3.39 ^{абг}
Ефективна маса	m0	0.07 ^а	0.32 ^б	0.2 ^{аб}
	ml	0.84 ^ж	0.45 ^е	0.21 ^е
	md	0.28	0.55 ^е	0.76 ^ж
	mt	0.4 ^ж	0.14 ^е	0.2 ^е
Ефективна маса густини станів	Г–долина	0.07 ^а	0.26 ^а	0.22 ^а
	Л–долина	1.08 ^ж	1.28 ^ж	0.35 ^ж
Константа міждолинної взаємодії	еВ/м	10 ¹¹ е	10 ¹¹ е	10 ¹¹ де
Частота оптичних фононів	см ⁻¹	586 ^е	902 ^е	739 ^{ае}
Енергія міждолинних фононів	еВ	0.83 ^ж	0.99 ^ж	0.08 ^а
Діелектрична проникність	Високочастотна	9.3 ^е	4.84 ^{ве}	5.35 ^{вде}
	Статична	15.3 ^{абве}	9.14 ^е	8.9 ^{вде}
Швидкість звуку	м/с	5.28 ^ж	9.06 ^ж	6.56 ^{де}
Акустический деформационный потенциал	эВ	7.1 ^ж	9.5 ^ж	8.3 ^д
Густина	г/см ³	6.91 ^г	3.23 ^г	6.1 ^{агд}
Енергія іонізації домішок	меВ	50 ^е	190 ^е	130 ^е

а – [29], б – [10], в – [23], г – [2], д – [39], е – [11], є – [31] ж – [3,4]